

一种基于多相位差的 RFID 标签三维定位方法

邱兰馨^{1),2),3)} 黄樟钦^{1),2)} 李达^{1),2)}

¹⁾(北京工业大学北京未来网络科技高精尖创新中心 北京 100124)

²⁾(北京工业大学北京市物联网软件与系统工程技术研究中心 北京 100124)

³⁾(国网浙江省电力有限公司信息通信分公司 杭州 310000)

摘要 在射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)系统中,如何在保证准确度的基础上实现对标签空间位置的实时感知是一个重要问题. 本文首次提出一种基于多相位差的标签三维定位算法 3DinSAR,适用于独立可移动的射频识别系统进行实时、高精度的三维定位,且不需提前部署任何辅助设施. 此方法依托干涉综合孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)的测高原理,在通过全息图谱方法获取二维伪坐标的基础上,利用不同高度上的多组相位差估算目标标签的高度信息,最后融合基于密度的聚类算法(Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN)实现相位解缠并给出三维坐标的估计结果. 同时本文还提出了一种快速计算方法,通过估计标签到达方向(Aperture Beam Predicting, ABP)来提升全息图谱的实效性,从而降低3DinSAR算法整体的时间开销. 仿真结果表明相较于原始的全息图谱方法,ABP方法能够有效减少99.4%的执行时间. 在实际环境下的实验结果表明3DinSAR的平均三维空间误差为24 cm,最小误差为6 cm,算法整体的运行时间小于95 ms.

关键词 无线射频识别;干涉综合孔径雷达;三维;定位;相位

中图法分类号 TP399 **DOI号** 10.11897/SP.J.1016.2019.02512

3D Tag Location Aware Scheme Based on Phase Interferometric for RFID Applications

QIU Lan-Xin^{1),2),3)} HUANG Zhang-Qin^{1),2)} LI Da^{1),2)}

¹⁾(Beijing Advanced Innovation Center for Future Internet Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

²⁾(Beijing Engineering Research Center for IoT Software and Systems, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

³⁾(State Grid Zhejiang Electric Power Company Information & Telecommunication Branch, Hangzhou 310000)

Abstract Many indoor applications require spatial information about objects. Example applications include item finding, object level mapping and large-scale objects managing in warehouses or libraries. RFID technology enables the identification and location of objects in our daily life by integration of RFID tags. The RF signals that the tags backscatter include a lot of information about the environment of the objects which can be used to derive the objects' spatial information. In 2016, the demand for applications in the apparel industry alone exceeded 4.6 billion RFID labels. Due to the emergence of three-dimensional (3D) printing, Microsoft and Disney Research have attempted to incorporate RFID-like embedded encoding information directly into objects during the manufacturing process, which may allow objects to be uniquely identified and sensed in the future. To this end, how to additionally aware the precision spatial position of the tagged target is an important and pressing research topic. Traditional localization methods based on RF signals with backscatter tags can be classified into the following two types: (1) trilateration

approaches that usually require multiple RFID readers placed in the environment, where the target position is determined by solving nonlinear equations based on the target—reader geometric relationship; and (2) scene analysis approaches that rely on the implementation of numerous tags with known positions as anchor nodes. However, both of these approaches have high implementation costs and it is difficult to apply them extensively in practice. In this paper, we propose a 3D localization scheme based on phase interferometric, named 3DinSAR. Our localization method does not need any reference tags and only one movable reader integrated with one antenna is required in order to construct the synthetic arrays to implement the locating system. The main idea is based on the 2D naive SAR localization. Rather than traversing all the spatial pixels which is time consuming and hence not efficient, we extend the naive hologram localization into a 3D scheme by using the spatial domain phase difference which relates to the wave path difference and the tags' height as additional information. Density-based spatial clustering method DBSCAN is used to give the final estimation target location to improve the accuracy. We also proposed an aperture-beam predicting method ABP to improve the real-time performance of 2D SAR method. In summary, the mainly contributions of this paper are: (1) We propose a 3D localization scheme based on phase interferometric for passive RFID system, named 3DinSAR, which is able to precisely estimate the tag's 3D location. (2) We further reduce the computational time required by using an aperture beam prediction (ABP) method, in order to improve the real-time performance. The main feature of the ABP method involves estimating the direction of arrival in order to ignore any unnecessary pixels when creating the holographic images. (3) Experiments are performed where 3DinSAR is implement with commercial off-the-shelf (COTS) RFID products. Comparing with naive 2D SAR method, the simulation results demonstrate ABP method has discount 99.4% of the time consumption. The experimental results from an indoor office environment show a spatial median error of 24 cm with minimum error 6cm for 3DinSAR, and the detection time maintain within 95 ms.

Keywords radio frequency identification; interferometric synthetic aperture radar; 3D; localization; phase

1 引 言

射频识别(RFID)技术属于物联网感知层中的一项具有代表性的关键技术,目前已被广泛应用于物流、零售等领域。在实际应用中,RFID系统主要由阅读器(Reader)和标签(Tag)组成:存储有唯一标识码和货物信息的标签被集成在商品上,事先部署的阅读器通过射频信号访问标签内部存储的数据,从而实现对商品状态的识别、追踪和管理。相较于条形码和二维码等依赖于视距通信的识别技术,RFID具有快速、批量处理的优越能力。目前,RFID自动识别技术及其相关研究已经成为国内外研究的热点课题^[1]。

RFID标签可以有源的,也可以是无源的。相比于通过自身携带的电池向阅读器发起主动通信的有源标签,无源标签无需电池、体积小,能够通过

反射阅读器的发射信号向阅读器反馈自身信息,因此被大量应用于形态各异但数目众多的日常商品中。有预测指出,到2017年仅服装业所需要的标签数量就将超过46亿枚^①。微软公司则尝试利用3D打印技术在商品生产的同时直接嵌入RFID无源标签^[2]。这使我们有望在未来真正实现“万物互联”的设想。

另一方面,在移动互联网的大规模发展趋势下,RFID技术与移动智能设备的结合将是构建以人、机、物三者深度融合为特征的信息社会的有效手段和必然结果,精准的位置信息则是进一步实现有效感知和控制的关键。例如,在对仓库货品进行盘点时,工作人员可利用手持式便携阅读器快速、直观地判断乱序、错放的货物并对其位置进行纠正;普通用户通过集成有RFID模块的智能手机,也能够在家

① IDTechEx Report: RFID Forecasts. Players and Opportunities 2016-2026. <http://www.idtechex.com>

中快速找到丢失的物品. 因此, 面向无源标签构建的移动 RFID 系统开展位置感知算法是当前国内外学术界的一个研究热点^[3-6].

现有的研究对标签二维平面位置的感知已取得较好的精确度, 如基于全息图谱(Holographic)的二维位置感知算法^[4]. 然而在将二维方法推广至三维空间时, 大部分研究仅开展了理论和仿真分析, 给出了相关方法可能的扩展方式, 但在实验验证方面则由于系统部署难度大、算法执行时间长等缺点难以得到有效的实验结果. 因此, 如何在保证精度的前提下, 快速感知标签的三维位置仍然是一个亟待解决的问题.

本文中, 我们针对无源标签构建的 RFID 系统, 首次提出一种基于多相位差的标签三维定位方法 3DinSAR, 旨在使 RFID 系统能够有效、实时地感知标签的三维位置. 该方法依托干涉综合孔径雷达的测高原理, 在通过全息图谱方法获取二维伪坐标的基础上, 利用不同高度上的多组相位差估算目标标签的高度信息, 最后融合基于密度的聚类算法 DBSCAN 实现相位解缠并给出三维坐标估计结果. 该方法适用于独立可移动的射频识别系统进行三维位置感知, 且不需提前部署任何辅助设施. 另外, 我们还提出一种快速计算方法, 通过估计标签到达方向来提升全息图谱的实效性.

本文主要创新点为:

(1) 针对无源标签构建的 RFID 系统, 首次提出一种基于多相位差的标签三维定位方法 3DinSAR, 能够仅依靠单天线的可移动阅读器获得较高精度的标签三维位置.

(2) 为进一步提高算法实时性, 我们针对平面全息图谱深度分析了孔径特性与位置感知结果间的关系, 在此基础上给出 ABP 方法, 通过估计标签到达角方向来缩短 3DinSAR 方法整体的时间开销.

(3) 首次在不需提前部署任何辅助设施的情况下, 在 3 m^3 大小的实际环境中利用商用 RFID 系统给出了标签空间定位的实验结果. 实验表明 3DinSAR 的平均空间距离误差为 24 cm, 基于 ABP 算法优化后的整体时间开销小于 95 ms.

本文在第 2 节我们介绍相关工作; 在第 3 节中建立系统模型; 第 4 节我们阐述 3DinSAR 方法, 之后通过对孔径特性的讨论, 将 3DinSAR 进行扩展并给出基于标签到达方向估计的快速计算方法; 第 5 节为仿真和讨论; 第 6 节我们给出实际环境下的实验结果; 最后, 第 7 节进行总结.

2 相关工作

目前, 研究人员利用无源标签反射链路中射频信号的特征值(例如信号强度(RSSI)、到达方位角(AoA)和到达相位(PoA)等), 对标签位置感知方法开展了研究, 主要可分为测距法和非测距法两类.

测距法^[7-9]通常需要在待测环境中部署多个阅读器并求解满足几何条件的非线性方程组来计算目标位置. 最早被提出的是 SoptON^[7]方法. 它利用部署在空间中的 4 个(任意 3 个非共面)阅读器所捕获的信号强度值, 从而通过空间传播损耗公式估计每个阅读器与标签之间的距离并求解标签位置. 利用 4 个阅读器与标签间的角度, 以及阅读器间的相对位置从理论上也可用于标签定位^[8]. 一种基于双曲线关系的二维标签定位方法由 Liu 等人^[9]提出, 虽然该方法被认为能够进行三维位置感知, 但并未得到实验证实.

基于位置指纹的非测距方法进行标签位置感知时, 不仅需要在环境中部署多个阅读器, 还需要大量已知位置的参考标签(也称为锚节点). 理论上, 根据安装在天花板及地板上多个阅读器对于待测标签的读取情况, 可以大致拟合标签所处的位置范围^[10]. 一些研究者为了降低部署成本和系统复杂度^[11], 也尝试在少量实际部署的参考标签中, 基于插值法拟合出符合对数传播损耗模型的虚拟标签, 并通过实验给出平均误差为 60 cm 的定位结果.

近年来, 有学者提出一种基于综合孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的全息图谱(Holographic)非测距方法^[4,12], 它能够利用单个可移动的阅读器而不依赖任何锚节点或额外阅读器实现目标的位置感知, 二维定位误差在 20 cm 左右. 在此基础上, Yang 等人^[5]给出了一种差分增强全息图谱计算方法, 使得计算误差能够缩小至 12 cm. 另外一些研究人员也以全息图谱方法为指导, 对移动 RFID 系统开展了相关研究^[13-15].

全息图谱方法将待搜索的二维平面抽象为位置像素阵列, 并基于射频识别阅读器在移动过程中多个位置上获得的标签反射信号相位值建立复指数函数. 该方法通过将像素的位置坐标一一代入复指数函数, 根据计算得到的复指数大小来估计标签所处位置. 然而如文献^[5]所述, 全息图谱方法在三维空间并不适用, 因为需要代入计算的像素点数量在从二维平面扩展至三维空间时激增了数千倍, 致使计

算时间无法满足实时性需求. 全息图谱方法针对一个精度为毫米级、大小为 3 m^2 的搜索平面进行位置估计时, 计算时间约 2 s ; 若以同样精度计算一个 3 m^3 的空间时, 其待计算的位置像素个数将增加 3000 倍, 相应的运算执行时间则增加至 1 h 以上. 虽然文献[5]也试图通过哈希表(HashTable)的相关原理来解决全息图谱时间开销的问题, 并有效提升了其在二维搜索平面上的计算效率, 但仍没能解决扩展至三维空间时动辄上千倍的增量计算需求.

与前述工作相比, 本文提出的 3DinSAR 方法参考干涉综合孔径雷达的测高原理, 利用多个随机高度上创建的二维全息图谱来取代对全空间的遍历计算, 有效解决了时效问题. 我们利用多组相位差值估计高程信息, 并借助聚类方法 DBSCAN 最终确定三维位置. 本文所提方法适用于移动射频识别阅读器下的标签三维空间定位, 并能够适应于多目标标签场合. 同时本文还提出一种快速计算方法, 通过估计标签到达方向来提升全息图谱的实效性.

3 系统模型的建立

3.1 系统模型

本文所述的三维空间定位方法适用于如图 1 所示的移动射频识别阅读器系统, 由固定位置的待测标签及集成天线的移动式阅读器组成. 该阅读器可以是一个通用的手持式阅读器, 其内部除集成有射频天线外还具有嵌入式处理功能和惯性传感器, 能够实时获得自身的相对位置并计算自身的移动轨迹; 也可以是一个由可编程移动机器人平台承载的座式阅读器, 其位置轨迹可通过移动平台进行设定或推算. 空间中允许存在单个或多个待测标签, 以待测标签中的唯一 EPC 编码作为标定值, 可以分时处理多个待测标签的射频信号.

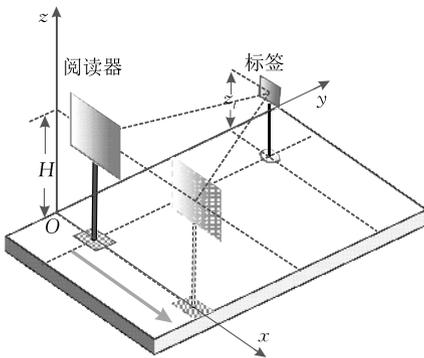


图 1 系统模型示意图

本文以阅读器的起始位置为原点建立初始的全局空间直角坐标系, 设阅读器起始位移方向为 x 轴正向, 天线辐射方向为 y 轴正向, 以此坐标系估计待测标签的位置. 待测标签可处于坐标系中的任意位置, 阅读器所处高度 H 通常与标签高度 z_i 不相等. 在实际情况中, 阅读器和天线间普遍存在位置差, 但本文中我们视阅读器与天线为整体, 不区分二者位置.

3.2 问题描述

移动过程中的阅读器不间断向空间辐射射频波, 随着自身位置的变化会收到标签不同的反射信号. 根据电磁波的传播原理, 假设阅读器与标签之间的空间直线距离为 d , 则阅读器调制解调后的标签反射信号的相位值可表示为

$$\varphi = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \bmod 2\pi \quad (1)$$

其中 λ 为载波波长, $\bmod(\cdot)$ 表示取余运算.

已知 A_i 为 t 时刻下的阅读器位置, φ_i 为 t 时刻下阅读器的实际相位测量值, 在没有误差的理想环境中, 实际值等于理论值 φ , 有 $|\varphi_i - \varphi| = 0$. 但考虑到空间中普遍存在的多径效应, 以及射频识别链路自身所带来的相位延迟, 有 $|\varphi_i - \varphi| = |c + c_{MP}|$. 其中 c 由阅读器及标签内部工艺决定, 包含读写器射程、标签回程和读写器收程中硬件链路的相位延迟, 不同读写器和标签的 c 值不同; c_{MP} 是随机偏差值, 由多径效应造成.

假设 $\{A_1, \dots, A_n, \dots, A_N\}$, $n \in N$ 为 N 个时刻下读写器的位置集合, $\{\varphi_1, \dots, \varphi_n, \dots, \varphi_N\}$ 为相应时刻下的测量相位值. 我们将目标所在三维搜索空间分割为 $W \times L \times H$ 个像素点并以 $X_{w,l,h}$ 代表 (w, l, h) 处的像素点, 则像素值 $p_{w,l,h}$ 可用式(2)计算^[4]:

$$p_{w,l,h} = \left| \sum_{n=1}^N P(X_{w,l,h}, A_n, \varphi_n) \right| \quad (2)$$

其中 $P(X_{w,l,h}, A_n, \varphi_n) = \exp(j(f(X_{w,l,h}, A_n) - \varphi_n))$,

$$f(X_{w,l,h}, A_n) = \left(\frac{4\pi}{\lambda} |X_{w,l,h}, A_n| \right) \bmod (2\pi).$$

式中前者 $|\cdot|$ 表示取绝对值, 后者则代表空间中两点所形成向量的模, 也就是求像素点所处位置与阅读器的空间直线距离; $\exp(j \cdot)$ 为复指数标识. $f(X_{w,l,h}, A_n)$ 的计算结果是像素点 $X_{w,l,h}$ 与第 n 个阅读器位置间距离所对应的理论相位值; $P(X_{w,l,h}, A_n, \varphi_n)$ 代表一个单位强度复指数信号, 其相位值等于 $f(X_{w,l,h}, A_n)$ 与实测值之差; $p_{w,l,h}$ 实际上代表着 N 个复指数信号迭加的效果, 它直接映射着位置

(ω, l, h) 上测量相位与理论相位两者间的差异情况. 对全空间中的像素点来说, 必然存在一个位置使 $p_{\omega, l, h}$ 有最大值, 即该位置相对所有阅读器位置的理论相位值与测量相位值误差之和最小, 因此我们视该坐标为待测标签的定位结果.

将二维全息图谱定位方法扩展到三维空间正是基于上述原理, 虽然它在理论上完全可行, 但在实际应用时却如第 2 节所述, 直接以式(2)遍历全空间中 $W \times L \times H$ 个像素点的将面临严重的时效性问题. 下文中我们重点介绍 3DinSAR 方法以及如何利用它规避对全空间像素点的计算, 从而提升算法的时效性, 使三维空间定位方法切实可行.

4 算法描述

4.1 3DinSAR

本节我们参考干涉综合孔径雷达三维定位的相关原理给出 3DinSAR 方法. 该方法核心内容是利用阅读器在不同高度移动采样过程中所产生的多组位置集合形成多条孔径 (Aperture), 其中每个位置可称为一个孔径单元 (Aperture Unit), 并通过每条孔径所在的二维平面进行全息图谱计算以取代对整个三维空间的运算.

4.1.1 二维全息图谱方法

假设阅读器在采样过程中共有 M 条孔径, $\mathbf{A}_i = \{A_{i,1}, \dots, A_{i,n}, \dots, A_{i,N}\}$, $i \in 1, 2, \dots, M, n \in 1, 2, \dots, N$ 代表 $M \times N$ 个位置. 所有孔径均是与 x 轴平行, 且两两间存在高程差的线性轨迹, 有轨迹方程为

$$\begin{cases} y=0 \\ z=h_i \end{cases}, i \in 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

设第 i 条孔径的起始点为 $(0, 0, h_i)$, 该孔径在各位置上阅读器采集到的待测目标载波相位值为 $\boldsymbol{\psi}_i = \{\varphi_{i,1}, \dots, \varphi_{i,n}, \dots, \varphi_{i,N}\}$, 其所在高度 h_i 上的 XOY 平面可被均匀分成由 $W \times L$ 个像素点所组成. 对此平

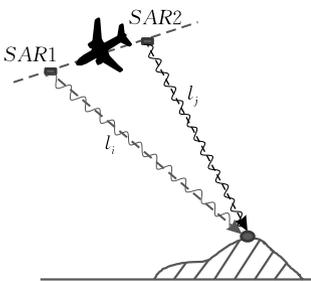
面上所有像素点执行式(2), 比较得到像素值最大的点, 其坐标可标记为 $\tilde{\mathbf{X}}_i = (\omega_i, l_i, h_i)$. 当待测目标与孔径高度相同时, $\tilde{\mathbf{X}}_i$ 即为目标的真实坐标. 但通常情况下, 目标可能存在于空间的任意位置, 与孔径不处于统一平面. 若设目标的真实坐标为 $\mathbf{X}_i = (x_i, y_i, z_i)$, 则此时 $\tilde{\mathbf{X}}_i$ 与 \mathbf{X}_i 不等, $\tilde{\mathbf{X}}_i$ 中含有目标与孔径间高程差所带来的模糊值, 我们称 $\tilde{\mathbf{X}}_i$ 为由孔径 i 得到的伪坐标, 具体来说真实坐标与伪坐标间的关系如式(4):

$$h_i = z_i \Rightarrow \begin{cases} \omega_i = x_i \\ l_i = y_i \end{cases}, h_i \neq z_i \Rightarrow \begin{cases} \omega_i = x_i \\ l_i = \sqrt{y_i^2 + (z_i - h_i)^2} \end{cases} \quad (4)$$

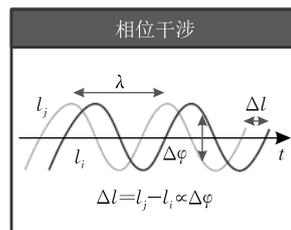
可见, 当目标所处位置与孔径不在同一平面时, 由全息图谱计算所得的伪坐标 $\tilde{\mathbf{X}}_i$ 实际是目标真实位置在孔径平面上的空间投影. 从空间几何上看, 若以 $(x_i, 0, h_i)$ 为圆心、以 l_i 为半径围绕孔径方向旋转一周, 可以得到一个垂直于孔径平面的圆. 根据式(4), 此圆上任意一点的空间投影均为 $\tilde{\mathbf{X}}_i$, 因此如何从圆上选出目标的真实坐标成为问题的关键. 处于不同高度上的孔径均可得到目标真实位置在孔径平面上的投影.

4.1.2 基于多相位差的高程估计方法

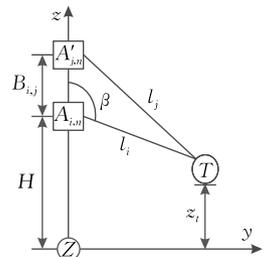
根据上节的讨论, 我们需从众多符合投影条件的点中选出真实坐标. 本文参考干涉综合孔径雷达 InSAR 的高程测量方法, 引入基于多相位差的高程估计方法, 如图 2(a) 所示, InSAR 方法通过移动 SAR 接收器来测量两个或多个不同位置处 SAR 接收结构间的相位差, 并以此估算目标高度. 相位差值随接收器移动的推移情况如图 2(b) 所示, 差值大小与移动距离、目标与接收器相对位置有关, 文献[16]中具体给出了三者间的关系, 以及如何通过相位差反演待测目标高度. 射频识别系统的通信方式与雷达近似, 因此利用两条或多条不同孔径间的相位差同样可以开展高程估计.



(a) 基于InSAR的测高原理



(b) 接收机移动与相位值推移的关系



(c) 3DinSAR测高过程

假设第 i 条和第 j 条孔径已通过全息图谱算法得到了各自的伪坐标. 如 4.1.1 节所述, 高程模糊信息仅被包含在 y 坐标中, 因此我们将空间场景投影至如图 2(c) 所示的 YoZ 平面. 该图即为 i, j 两条孔径在 $x = x_t$ 处的侧切图: 轨迹高度 $h_i < h_j$, 高度差 $B_{i,j} = h_j - h_i$, 以 $(x_t, 0, h_j)$ 和 $(x_t, 0, h_i)$ 为原点的空间圆半径分别为 l_j 和 l_i ; β 为 h_i 和 $B_{i,j}$ 间的夹角. InSAR 理论中基线(Baseline)的概念对应此处的高度差 $B_{i,j}$. 由几何关系可知, 标签的实际位置应是两个空间圆的交点, 因此有:

$$\begin{cases} y_t = \sqrt{l_i^2 - (z_t - h_i)^2} \\ z_t = h_i + l_i \cos(\beta) \end{cases}, \cos(\beta) = \frac{l_i^2 + B_{i,j}^2 - l_j^2}{2B_{i,j}l_i} \quad (5)$$

l_i 和 l_j 由 4.1.1 节来自基于全息图谱计算出的伪坐标. 由于在实际环境下存在误差, 直接将 l_i 和 l_j 代入计算式(5)可能出现无解的情况(即两个空间圆没有交点), 因此我们参考 InSAR 高程测量原理通过相位差 $\Delta\varphi_{i,j}$ 来避免直接使用 l_i 和 l_j 计算, 它代表 i, j 两条孔径在 $x = x_t$ 处阅读器测得的相位差值即 $\Delta\varphi_{i,j} = |\varphi_{i,x=x_t} - \varphi_{j,x=x_t}|, i \neq j$. 我们可以将 l_j 表达为

$$l_j = l_i + \frac{\Delta\varphi_{i,j} + 2k\pi}{4\pi} \lambda, k \in \left[-\frac{2B_{i,j}}{\lambda}, \frac{2B_{i,j}}{\lambda} \right] \quad (6)$$

由于实际测量中得到的相位值是以 $2k\pi$ 为周期的基值, 因此式中 $2k\pi$ 是用来补偿无法测量的相位周数. k 的大小随 l_i, l_j 间的差程正比例线性变化, 当两者差程等于基线时有最大值, 可用于估计 k 边界. 然而仍存在相位缠绕(Phase Wrapping)问题, 难以对区间内正确的 k 值进行准确判定. 我们暂且将区间内的 k 值均代入式(6), 从而得到 i, j 两条孔径组合下的标签候选点子集 $o_{i,j}$, 点集内候选三维位置坐标的具体计算方式如式(7):

$$\begin{cases} x_t = w_i \\ y_t = \sqrt{l_i^2 - (z_t - h_i)^2} \\ z_t = h_i + \frac{B_{i,j}^2 - l_i \left(\frac{\Delta\varphi_{i,j} + 2k\pi}{2\pi} \right) - \left(\frac{\Delta\varphi_{i,j} + 2k\pi}{4\pi} \right)^2}{2B_{i,j}} \end{cases} \quad (7)$$

M 条孔径中的任意两条孔径组合都可得到如 $o_{i,j}$ 的候选点子集, 我们将所有子集归纳为候选点集合 O .

需要说明的是, 阅读器在移动采样过程中, 可能存在 $x = x_t$ 处并没有相对应的实际测量相位. 然而对于本文算法来说, 该相位值是必须的. 因此我们利用 x 轴上其余位置处的测量相位进行曲线拟合, 给出 $x = x_t$ 位置上的插值相位, 用以开展后续计算. 式(8)由式(1)改写而来, 表示第 i 条孔径的相位拟

合结果, 其中拟合相位被表示为仅与阅读器 x 轴坐标 $x_{A_i,n}$ 有关:

$$\varphi_{i,n} = \left(\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(x_{A_i,n} - a)^2 + b} \right) \bmod 2\pi \quad (8)$$

a 和 b 在这里被视为常数, 依次表示目标的 x 轴坐标值以及读写器与目标间的空间距离在 YoZ 平面上的投影. 因此我们以阅读器 x 为自变量针对采样相位开展双曲线拟合 $x: \psi_i = \sqrt{(a_i x^2 + b_i x + c_i)} + e_i$, 其中需估计的参数有 a_i, b_i, c_i 和 e_i , e_i 表示测量相位值与理论相位间存在的整周相位.

4.1.3 DBSCAN 聚类方法

通过 4.1.2 节的讨论, 目标可能存在的位置从以孔径为轴的空间圆上任意点缩小为候选点集合 O . 为从候选点集合 O 中选出待测目标的位置, 本文引入 DBSCAN 算法. DBSCAN 属于聚类算法中的一种^[17], 它通过定义簇半径 E 和簇内最低样本数 $MinPts$ 将空间中高密度点集区域分为不同的簇, 而散落的点则被定义为噪声. 对于本文中的候选点集合 O 来说, 其有普遍成立的性质 1.

性质 1. 任意两条孔径所产生的候选点集合中, 都包含一个点的坐标与目标实际位置对应.

即从理论上讲, 若我们把候选点集合 O 依次根据坐标在空间中绘制出来, 目标的实际坐标将成为一个公共点, 有多个候选点会在该位置上重合. 从实际情况出发, 由于环境噪声和测量误差的影响, 多个候选点可能不会重合, 但会围绕实际坐标在空间中形成一个高密度区域, 可使用 DBSCAN 算法进行聚类.

通过 DBSCAN 算法, 本文将候选点集合 O 中的点聚类至多个簇或判定为噪声. 再通过比对簇中坐标点的个数, 找出密度最大的簇并对簇中所有点取平均位置, 则该位置为目标的最大概率估计结果. 目标的三维坐标具体计算方法如式(9)所示, 其中 Q 为密度最大的簇中候选点的总个数.

$$(x_t, y_t, z_t) = \frac{\left\langle \sum_1^Q x_q, \sum_1^Q y_q, \sum_1^Q z_q \right\rangle}{Q} \quad (9)$$

经过反复实验, 我们发现还存在如下性质 2.

性质 2. 当且仅当两条孔径对应位置处的相位差均为零时, 它们各自与任意第三条孔径所产生的候选点子集中存在多个公共点.

也就是说, 当有两条或以上孔径正好满足在 $x = x_t$ 处相位差为零的条件时, 运行 DBSCAN 算法将得到多个内部点数一致的簇, 从而无法开展后续

的定位计算. 由于相位差由阅读器到标签的路径差决定, 而在实际应用中阅读器的移动是随机的, 若不对孔径加以一定的约束, 则有可能发生性质 2 中的情况. 因此在开始估计高程坐标之前, 通过对比 $x = x_i$ 处的相位值, 我们提前对孔径进行筛选. 对相位值相同的多条孔径仅选取其中一条, 以确保剩下 M' 条孔径中任意两条的相位差不为零. 此时 $M' \leq M$, 候选点集合实际为 $O = \{o_{i,j} \mid i, j \in M', j \neq i\}$. 本文所述 3DinSAR 的主要步骤如算法 1 中伪代码所示.

算法 1. 3DinSAR 标签三维位置感知算法.

输入: M 条孔径的阵元位置向量 \mathbf{A}_i 及对应相位向量 $\boldsymbol{\psi}_i$

输出: 标签三维坐标 (x_t, y_t, z_t)

1. FOR $i \leq M$;
2. $\tilde{X}_i = (w_i, l_i, h_i) \leftarrow \arg \max(p_{w,l,h})$
/* 计算 M 条孔径的伪坐标
3. $\varphi_i = f_i(x)$ /* 进行相位拟合
4. IF $|\varphi_i - \varphi_{<i} \neq 0$ THEN /* 判断绝对相位差
5. $A' = \text{add}(\mathbf{A}_i)$ /* 将 \mathbf{A}_i 加入新的孔径集合
6. END
7. $M' = \text{length}(A')$ /* 新孔径集合中的孔径个数
8. FOR $i \in [1, M' - 1], j \in [i, M']$ /* 遍历 $C_M^{M'}$ 孔径组合
9. $\Delta\varphi_{i,j} = |\varphi_{i,x=x_i} - \varphi_{j,x=x_i}|$ /* 计算空域相位差
10. $B_{i,j} = l_j - l_i$ /* 计算基线
11. FOR $k \in [-2B_{i,j}/\lambda, 2B_{i,j}/\lambda]$ /* 遍历所有 k 值
12. $z_t = Z(H, B_{i,j}, l_i, \Delta\varphi_{i,j}(k))$ /* 计算高程
13. $o_{i,j} = o_{i,j} \cup (x_t, y_t(l_i, z_t), z_t)$ /* 计算候选点
14. END
15. $O = O \cup o_{i,j}$ /* 形成所有候选点集合
16. END
17. $o_q = \text{DBSCAN}(O)$ /* 选择最大密度区域
18. $(x_t, y_t, z_t) = \text{centroid}(o_q)$ /* 计算三维位置

4.2 曲线孔径下的 3DinSAR

4.2.1 孔径特性

前文中所讨论的内容均基于孔径轨迹与 x 轴完全平行的假设. 阅读器在移动过程中所形成的多个

等间隔采样位置, 实际可视作一个均匀线性阵列天线 (Uniform Linear Array, ULA). 从理论上来说^[14], ULA 天线辐射主瓣大小在 x 轴分量上的宽度一般可通过式(10)计算:

$$\Phi_x = 0.886\lambda/L \quad (10)$$

其中 L 为孔径长度. 辐射主瓣在 y 轴上的宽度决定于标签到天线的距离, 当标签距天线较近时, y 轴上宽度可测, 标签位置处于主瓣区域的中心; 而当标签距天线较远时, y 轴分量上的宽度不可测且接近无穷, 指向标签所在的方向. 图 3(a) 是一条 900 MHz 频段下、长度为 3 m 的阵列天线为基础所绘制的灰度全息图谱, 其中被浅色区域包围的深色部分为主瓣, 附近较亮部分为副瓣, 其余的大片区域均为非辐射区域.

从阵列天线的角度来看, 我们希望尽可能突出主瓣的同时削弱副瓣, 从而越清晰地标定标签可能存在的范围边界. 较长的阵列长度和较小的孔径单元间距能够帮助实现上述目标, 从而提高定位精度和抗干扰能力. 相反的, 若副瓣未能被有效抑制, 且恰与多径效应叠加使得其强度高于主瓣, 则易产生定位偏差. 同时, 为了避免相邻两个孔径单元的采样相位浮动超过 π , 则孔径单元间距不应大于波长的四分之一. 无源 RFID 通信频段在 900 MHz 波段, 最大孔径单元间距应不超过 8 cm. 第 5 节中我们将对阵列长度、孔径单元间距对孔径特性的影响进行仿真.

4.2.2 任意孔径下的 3DinSAR

对于同一标签位置, 当孔径形状不同时, 全息图谱计算结果会完全不同. 从图 3(a) 中不难看出, 当孔径方向与 x 轴平行时, 图中计算结果 (白色标记) 随孔径高度升高沿 y 轴移动, x 轴坐标估计值与实际坐标相等; 由高度变化带来的模糊值只存在于 y 轴坐标中. 而在图 3(b) 中, 当阵列天线与 x 轴呈现

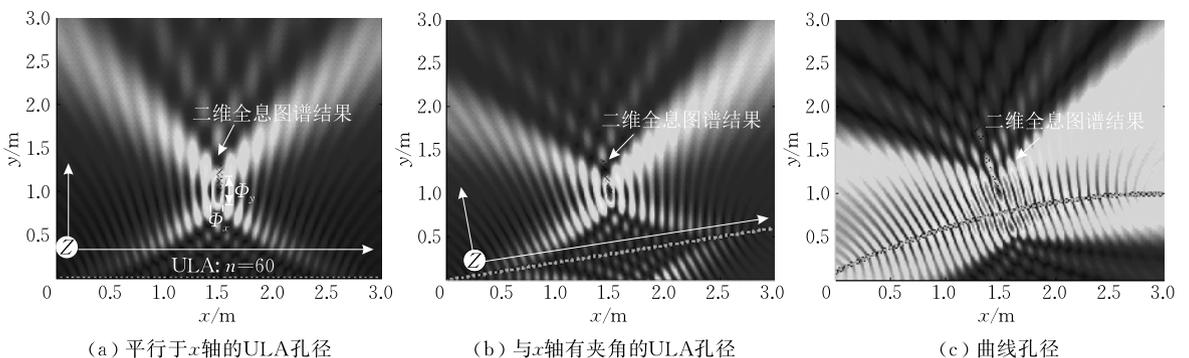


图 3 二维 SAR 全息图谱

倾角时,全息图谱计算结果的变化趋势则在 x 轴和 y 轴都有分量,从而导致目标的 x 轴坐标不能被判定,无法开展后续计算.图 3(c)中是一条曲线孔径所产生的全息图谱,此时已不再符合前文所述的孔径特性,3DinSAR 亦不适用.乘着使 3DinSAR 更具实用性,便于在更多场景下应用,下面本文讨论如何扩展 3DinSAR.

首先当孔径为任意空间直线时,计算结果同时沿 x 轴和 y 轴变化是相对于初始孔径建立的坐标系而言的,若调整坐标系到当前孔径下,则全息图谱的计算结果相对于新坐标仍将仅延 y 轴变化.因此,我们可以通过连续旋转和平移坐标系使 3DinSAR 适用于此类情况.

若 $(x_{A_0}, y_{A_0}, z_{A_0})$ 代表孔径的初始坐标, (α, β, γ) 依次为以孔径移动方向作为 x 轴正方向设立的新坐标系与原始坐标系的倾角,则原始坐标系中的伪坐标 (w, l, h) 在新坐标系下的值 (w', l', h') 应为

$$\begin{bmatrix} w' \\ l' \\ h' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{A_0} \\ y_{A_0} \\ z_{A_0} \end{bmatrix} + \mathbf{\Gamma} \begin{bmatrix} w \\ l \\ h \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{\Gamma}$ 是坐标系旋转矩阵

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & -\sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & \sin\beta \\ 0 & -\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

它的物理意义仍是以 $(w', 0, 0)$ 为原点、围绕孔径方向以 l' 旋转而成、垂直于孔径平面的圆环.同理,任意孔径都可以通旋转得到自身坐标系下的伪坐标.所有孔径产生的空间圆仍然具有相交于标签实际位置的性质.

采用 3DinSAR 进行空间定位时,选取任意两条孔径 i 和 j ,需分别给出各自处于 $x=w'$ 位置时的相位值并计算空域相位差值 $\Delta\varphi_{i,j}$.在如 4.1.2 节求解标签可能的高度值之前,我们需通过判断两条孔径的高度,再进行一次坐标系旋转,将较低孔径所在坐标系统一至较高孔径所在的坐标系,使其形成如图 2(c)所示的平面投影.若用 (w'_i, l'_i, h'_i) 和 (w'_j, l'_j, h'_j) 表示各自坐标系下的全息图谱结果, (w''_i, l''_i, h''_i) 表示低孔径统一至高孔径的二次旋转坐标,则 l''_i, l'_i 和 $\Delta\varphi_{i,j}$ 满足式(5)中的关系.式(6)中 $\Delta\varphi_{i,j}$ 与 l'_i 和 l'_j 的路径差成正比.可改写式(7)计算得到以高孔径所建立的新坐标系下的标签位置候选点:

$$\begin{cases} x'_i = w'_j \\ y'_i = \sqrt{l'^2_j - (z'_i - h'_j)^2} \\ B^2_{i,j} + l''^2_i - \left(l'_i + \frac{\Delta\varphi_{i,j} + 2k\pi}{4\pi} \right)^2 \\ z'_i = h'_j + \frac{2B_{i,j}}{2B_{i,j}} \end{cases} \quad (12)$$

最后,还需再旋转一次坐标系,将所有孔径组合的候选点集坐标整合至初始坐标系下,以开展 DBSCAN 聚类.综上,在将 3DinSAR 扩展至空间任意直线孔径时,总计需旋转三次坐标系即可获得初始坐标系下的目标坐标.

另一方面,当孔径为空间曲线时,其全息图谱的计算结果与直线不再相同,也无法通过坐标系旋转使其具有类似直线孔径下的物理意义.类似于文献[18]中的曲线综合孔径雷达(Curvilinear synthetic aperture radar),此时伪坐标可能存在的位置是一个与曲线孔径轨迹有关的空间曲面,前文中所述直线孔径下所产生的均匀圆环,其实是曲线孔径的一个特例.由于曲线孔径形状与曲面的关系较难掌握,且直接计算曲线孔径会有极高的副瓣效应,因此针对空间曲线孔径,我们选择通过高斯-牛顿法将曲线孔径分割为多个直线孔径来迭代计算近似结果.若阅读器曲线轨迹已知,则我们可以给定一个阈值,使得当阅读器位移向量的方位偏差在阈值范围内时,则视这一组阵元符合线性关系.参考孔径特性,当阵元组成的直线孔径长度大于 30 cm ^[4],阵元间距小于 8 cm 时,可用作全息图谱的计算.在阅读器的移动过程中,可采用先进先出(MIMO)原则不断排列组合多条孔径进行计算,并迭代更新孔径数据,实时刷新 3DinSAR 的计算结果来提高定位精度.

4.3 估计标签到达方向

从图 3 中可知,标签可能出现的位置集中于主瓣和副瓣处,在全息图谱中仅占极小部分,而标签几乎不可能出现的非辐射区却占据图中大部分区域.若能够在执行全息图谱时避开非辐射区域的像素点,则可以大幅削减全息图谱的计算时间,从而提升算法整体的时效性.由此思想为出发点,考虑前文中讨论的孔径特性,我们给出基于标签到达方向估计的快速计算方法.

对于全息图谱物理含义的解读方式除 3.2 节所述外,还有下述解读方式.对于孔径 i 来说,由读写器至目标间的空间距离与相位值间的关系式(1)所知,若孔径单元 $A_{i,n}$ 和其所对应的测量相位值 $\varphi_{i,n}$ 已知时,因整周相位的存在,整个待遍历的平面中会有

多个点满足关系 $f(X_{w,l,h}, A_{i,n}) = \varphi_{i,n}$ (参见式(2)), 可用 $\kappa_{i,n} = \{X | f(X_{w,l,h}, A_{i,n}) = \varphi_{i,n}\}$ 来表示, 它们在空间形式上表现为以 $(\varphi_{i,n} + 2k\pi)\lambda$ 为半径的一组同心圆. 同样的, 对于孔径单元 $A_{i,m}$ 及其所对应的测量相位 $\varphi_{i,m}$, 同样存在一组同心圆满足关系 $\kappa_{i,m} = \{X | f(X_{w,l,h}, A_{i,m}) = \varphi_{i,m}\}$. 两组同心圆势必会在平面上形成多个交点 $\{\kappa_{i,n} \cap \kappa_{i,m}\}$, 目标的真实坐标包含于上述交点中. 随着孔径单元及其相位值的增加, 满足 $\{\kappa_{i,n} \cap \kappa_{i,m} \cap \dots \cap \kappa_{i,N}\}$ 关系的交点会最终减少到仅剩下一个点对应目标的实际坐标.

如果从 N 个孔径单元中任意选择 s 个, 其交集集合可表示为 $\hat{\kappa}_s = \{\bigcup_{i=1, j>i}^s \{\kappa_{i,n} \cup \kappa_{i,m}\}\}$. 因目标的实际坐标理论上包含在交点集合 $\hat{\kappa}_s$ 中, 事实上可以对 $\hat{\kappa}_s$ 中的点进行全息图谱计算并选取最大像素值的点 $K = \arg\max(p_{\hat{\kappa}_s})$ 即可, 从而避免对二维平面的搜索. 由于误差的存在, 点 K 未必是目标的准确位置, 但点 K 与孔径中心连线方向依据孔径特性, 表征着目标标签的到达方向.

为进一步提高计算准确度, 我们围绕 K 来给出一个菱形搜索框, 它以 K 为中心、以 x 轴方向为宽边, 以到达方向为长边, 宽边长度 Φ_x 由式(10)给出, 长边 Φ_y 通常设定大于宽边. 以式(2)遍历计算菱形框内所有像素点的值, 并选取最大值作为目标的伪坐标. 我们称其为标签到达方向估计方法, 它能够使单条孔径的全息图谱计算时间大大降低, 从而有效提高 3DinSAR 算法的时效性. 第 5 节中对该方法的一些重要参数进行了仿真分析.

5 仿真结果

我们通过调整各类参数对 3DinSAR 方法进行仿真分析以评估其性能. 首先分析阵列天线长度、孔径单元间距等孔径特性参数对全息图谱结果的影响, 然后比较标签到达方向估计方法与文献[5]中基于哈希表的方法对全息图谱时效性的优化效果, 最后分析基于 InSAR 的测高原理及 DBSCAN 各参数对最终三维定位精度的影响. 算法均采用 Python 进行编译, 运行环境为 2.5 GHz 及 16 GB 内存的 Intel Core i5 处理器.

5.1 孔径对全息图谱的影响

3DinSAR 的定位结果依赖于全息图谱算法的计算精度, 研究孔径特性对于全息图谱的影响, 有助于在实际应用时选取更为合适的孔径来降低算法误差. 同时, 若想将本文方法推广至由读写器移动所带

来的随机空间孔径, 需要我们掌握孔径的特性. 仿真过程中, 整个搜索平面被设置为 3 m^2 , 像素点精度为毫米级, 主要通过调整阵列天线长度和孔径单元间距来考察孔径特性的意义.

我们首先固定孔径长度, 通过改变孔径单元间距观察定位误差. 如图 4 所示, 待定位标签坐标为 $(2, 1.5)$, 整个孔径长度被设定为 2 m , 孔径单元沿 x 轴等间隔分布, 单元个数 n 分别为 10、25、50 和 100, 个数越多说明间隔越小. 我们在理论相位的基础上加入 $\text{SNR} = 10 \log(\varphi/\sigma)$ 信噪比的白噪声, 并将其代入式(2)计算全息图谱. 图中指出在噪声相同时, 不同孔径长度得到的二维全息图谱定位距离误差 $\Delta d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ 随孔径单元个数的变化情况. 可以看出, 孔径单元个数越多, 对应的间隔就越小, 其抗干扰能力越强, 定位精度也越高.

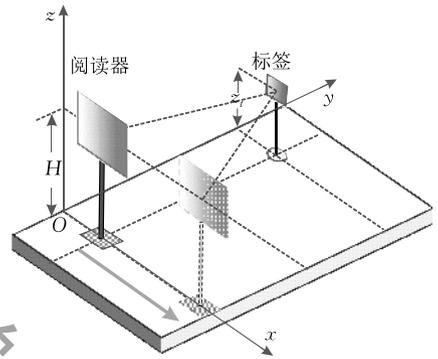


图 4 孔径长度为 2 m , 定位误差在不同阵元数时随相位噪声的变化情况

图 5 表示了当相位噪声为 10 dB 时, 相同孔径单元个数下, 定位结果的距离误差随孔径长度的变化情况. 设定的孔径长度分别为 0.2 m 、 0.4 m 、 0.8 m 和 1.6 m , 当孔径越长时, 无论单元个数是多少, 其定位精度都优于短孔径, 且长孔径精度的提升比缩

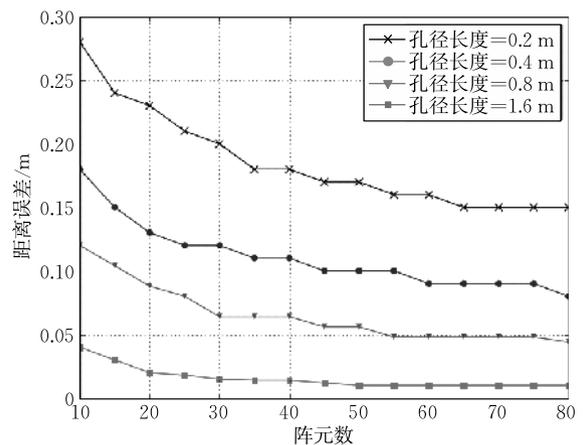


图 5 不同孔径尺寸下, 定位误差随阵元数的变化情况

短孔径间距更加显著. 实验时, 虽然除过白噪声还有多径效应的影响, 但整体情况与仿真得到的结论基本相符.

5.2 ABP 方法对时效性的影响

本节对 4.3 节中所述的标签到达方向估计方法进行仿真评估. 遍历平面以毫米为精度, 孔径长度设定为 3 m, 孔径单元在 x 轴 $[0, 3\text{m}]$ 区间内以 5 cm 的

孔径间距分布. 如图 6 所示为采用不同孔径单元数进行标签到达方向估计时, 所产生的交点个数和方向估计结果. 可以看出, 当孔径单元数为 3 或 30 个时, 估计的方向基本相同, 但得到的交点个数却从 500 个扩张到近 7 万个. 图 7 中, 我们针对孔径单元数为 3、9、30 时, 采用 100 个随机生成的标签位置来比较它们的估计精度和时效性.

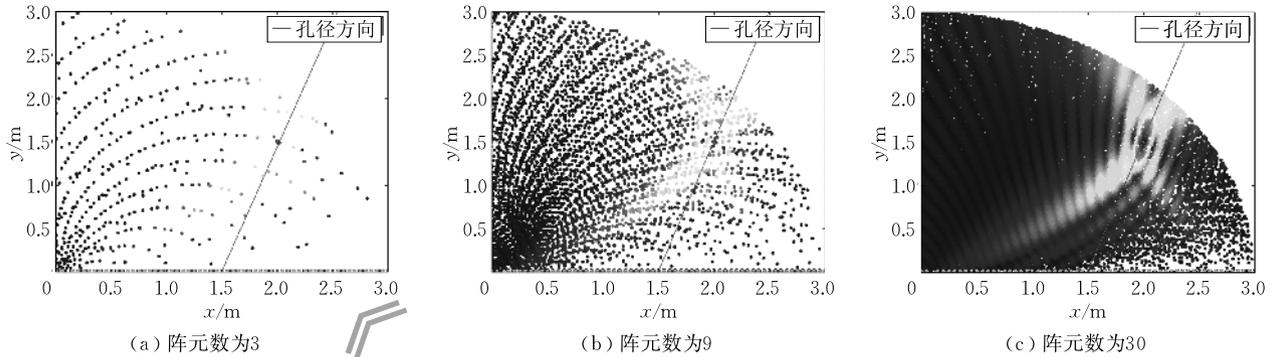


图 6 不同阵元数下的交点个数及孔径方向估计

图 7(a)和图 7(b)分别展示了不同孔径单元数下, ABP 方法的平均执行时间及方向估计误差的分布情况. 可以看出, 孔径单元数的增加除了增加执行时间外, 没有显著提升方向估计的精确度, 无论单元数是多少, 绝大多数的估计误差都控制在 0.1 弧度以内. 同时, 仿真结果还表明当孔径间隔由 5 mm 增加至 1 m 时, 交点数量从 500 个增多至 7000 个以上. 这说明近似于增加孔径单元数, 增加孔径间距同样会使得方向估计的误差稍有降低, 但实时性则受到严重影响. 因此在后续实验中, 我们采用 3 个连续

的孔径单元进行方向估计, 以最大程度的缩短计算时间.

图 7(c)中我们比较了当孔径单元数为 3 时, 标签方向估计法、哈希表方法以及原始的全息图谱计算. 不论是方向估计法还是基于哈希表的方法, 相较于原始方法都在时效性上有很大幅度的提升. 具体来说, 方向估计法相较于哈希表法提升了 82%, 相较于原始方法则提升了 99.4%. 对于 3DinSAR 而言, 方向估计法能够大幅降低在多个孔径下计算全息图谱的时间, 从而提升整个算法的时效性.

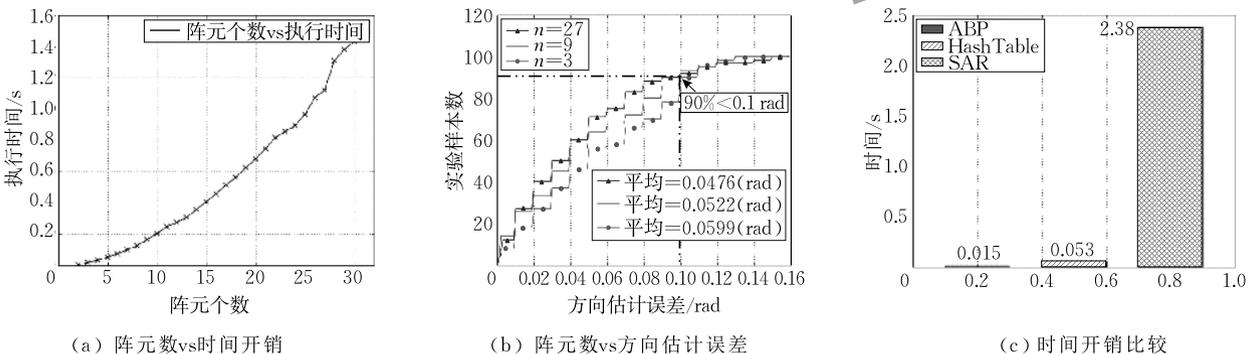


图 7 ABP 方法仿真

5.3 InSAR 高程测量结果

基于标签到达方向估计快速完成多条孔径的平面全息图谱计算后, 我们就可以根据 InSAR 测高原理开展后续的高程估计和三维定位. 如图 8(a)所示为利用多条孔径的理论相位差值进行高程计算后,

在 $x = x_i$ 平面上散落的所有候选坐标点. 可以看出, 任意两条孔径组合下均有候选点与标签实际位置重合, 其余点则被视为整周相位带来的噪声. 图 8(b)则展示了当相位存在干扰值时, 任意孔径组合下的候选点不再能全部与标签实际位置相交, 而是存在

一定的偏差,分布在实际位置周围并在图中呈现一个高密度区域.这正是后续开展 DBSCAN 进行聚类的基础,该高密度区域的中心即为目标的估计位置.还需要说明的是,为避免发生性质 2 中所述的存在多个高密度区域的情况,虽然 3DinSAR 方法在实际应用中基线大小是随机的,但在计算时算法会自动对绝对相位差为零的孔径进行过滤.

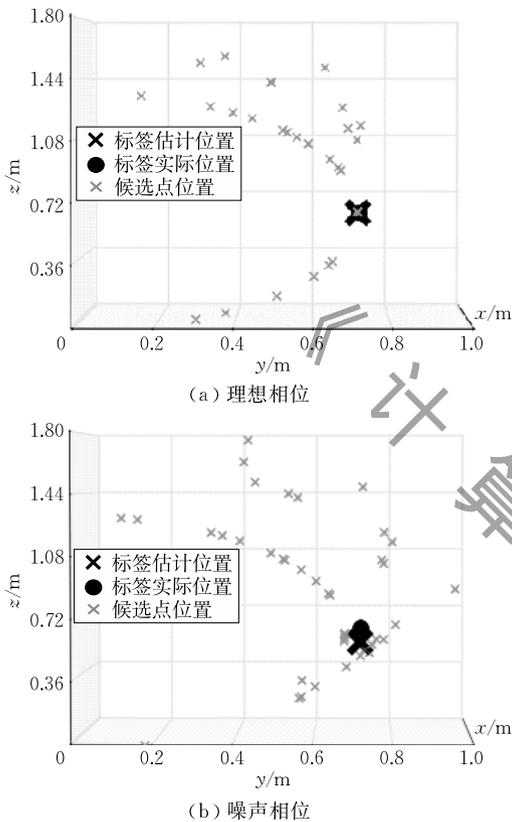


图 8 候选点分布情况

5.4 DBSCAN 参数对三维结果的影响

如图 8(b) 所示在相位值有误差时得到的高密度区域,需要依靠 DBSCAN 算法将它们筛选出来并最终确定目标的三维坐标.我们通过分别调整簇半径 E 和簇内最低样本数 $MinPts$ 的值来考察它们对于定位准确度的影响.图 9(a) 展示的是当 $MinPts$ 为 5 时,簇半径与定位误差间的关系.不难发现,当簇半径 E 过大,会因为把超出高密度区域范围的噪声点也统计在内,从而导致误差增大;然而当簇半径太小时,也可能导致半径区域内的点数未能达到最低样本数的阈值而聚类失败.图 9(b) 中,簇半径被设定为较为适中的值,如 5 mm, $MinPts$ 的变化所带来的定位误差差异并不大.相比而言,簇半径的选取比最小样本数更为关键.在实际应用时,为避免出现聚类失败或误差过大的情况,我们将根据经验值将最小样本数设为固定值,并采用动态领域半径来选

取最佳簇半径.具体来说,我们首先设定最小样本数为 5,并将簇半径设定为初始值 1 mm;然后以 1 mm 为单位连续递增簇半径,当有满足最小样本数条件的簇出现时即停止迭加.此时给出的计算结果为最终的定位结果.由于不同环境下最小样本数的经验值会有偏差,因此通过动态领域半径给出的计算结果中仍在一定程度上存在误差.

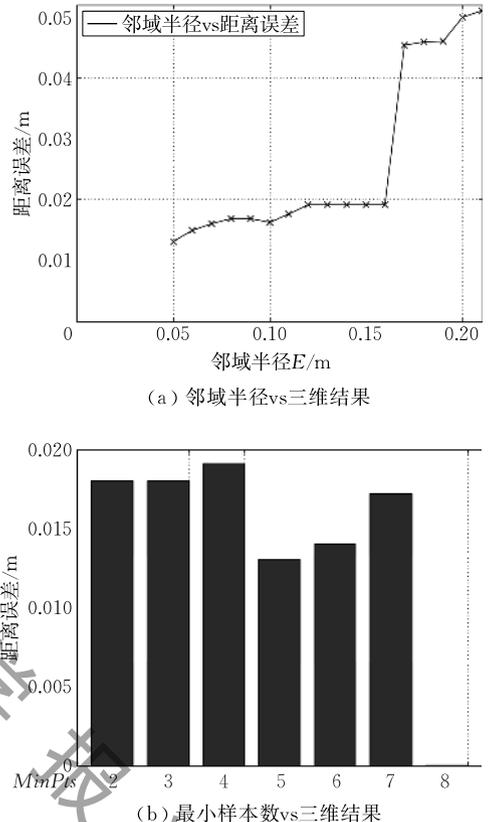


图 9 簇半径和 $MinPts$ 对定位准确度的影响

6 实验结果

6.1 实验结果分析

上文中我们对 3DinSAR 方法的基本原理进行了说明并开展了仿真分析,本节通过在实际环境下开展实验来验证算法准确性.在图 10 中,一台符合 EPCglobal C1G2 协议的商用阅读器 Impinj R420^① 被用于实验,阅读器及待测标签所处的实验环境大小为 3 m^3 .该读写器符合并兼容 EPC LLRP 协议^②,能够基于标签反射链路中解调出精度为 0.006 弧度的相位主值.环境中有 6 个待测标签,我们沿直线移

① Impinj R420 COTS RFID Reader. <http://www.impinj.com>
 ② EPCglobal Low Level Reader Protocol (LLRP). <http://www.llrp.org>

动一个 5.5 dBi 增益的天线实现待测标签的相位采样,辐射功率设定为 30 dBm EIRP,载波频率固定在 920.625 MHz. 初始坐标系方向如图中箭头标出,阅读器天线以随机选取的高度 0.63 m、0.85 m、0.95 m、1 m、1.1 m 和 1.15 m 在 x 轴方向从 0.2 m 到 1.9 m 按 0.05 m 步进行采样,从而形成 6 条陈列天线. 阅读器在每个位置上的采样时间为 10 s,每个标签的采样个数约为 600 个. 如图 11 所示为标签 6 在 1.15 m 高度处 $x=0.25$ m 时的相位值归一化统计情况,它满足正态分布. 我们以这 600 组相位数据的平均值作为该阅读器位置的实测相位.

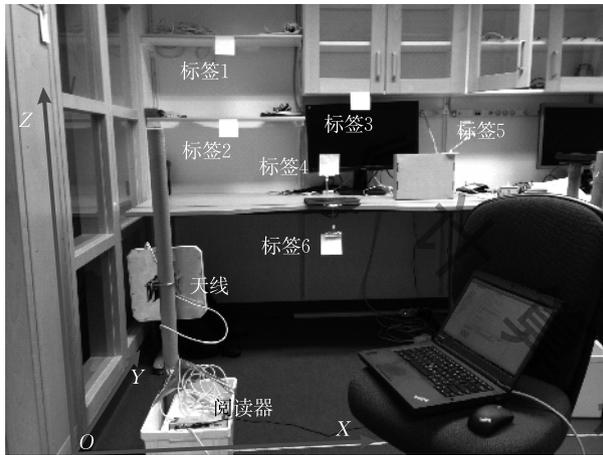


图 10 实验环境实验图

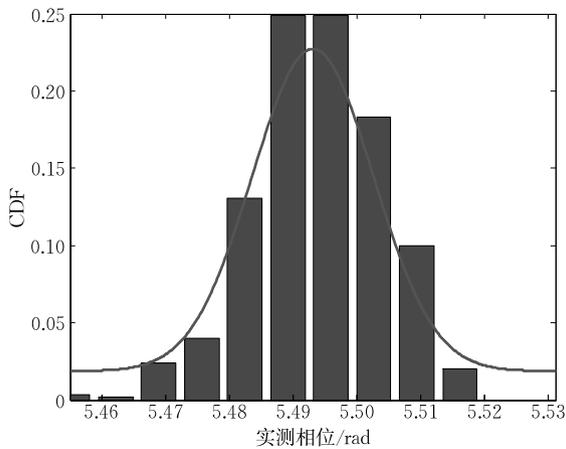


图 11 实测相位正态分布情况

图 12 为阅读器处于 0.63 m 高时的测量相位及拟合相位结果. 图中最上层曲线代表理论推演的相位值,最下层曲线代表理论相位主值,它是推演值去除整周模糊后的结果;三角符号曲线为实测相位值,它与理论相位主值存在由系统误差和环境干扰带来的延迟差异. 在实验过程中,系统带来的延迟通常不会因阅读器的移动而改变,但不同采样位置上的多径效应会为测量相位加入随机误差;圆形符号曲线

代表实际用于计算相位差的、基于双曲线拟合得到的相位值.

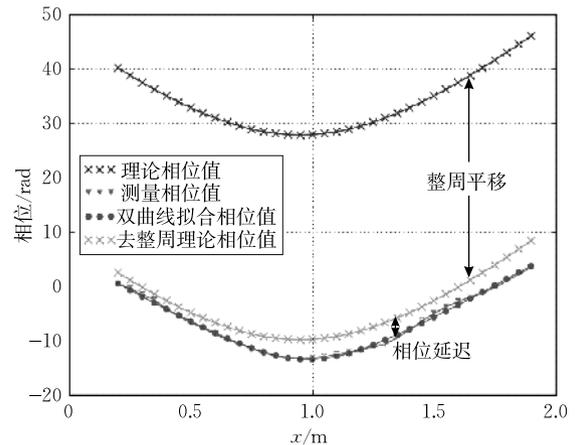


图 12 相位拟合结果

待测目标的定位结果如表 1 和图 13 所示. 基于算法 1 的定位结果精度以毫米为单位,在 $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 2\text{ m}$ 实验区域内,3DinSAR 方法的空间平均误差为 24.2 cm,其中 6 号标签有最小误差 6.3 cm. 与其它非测距类方法^[11]相比,在同样的实验区域内,3DinSAR 在不借助任何位置已知的锚节点的情况下,将空间定位结果的准确度提升了近 60%. 文献[5]通过优化全息图谱方法给出的定位结果误差在 12 cm 左右,然而实验区域仅在 1 m^3 内. 此外,文献[6]中的 PinIt 算法平均定位误差在 23 cm 左右,与 3DinSAR 的定位准确度近似,前者可用于查找书架图书等场景,说明此误差水平下的定位算法已能够适用于部分实际场景.

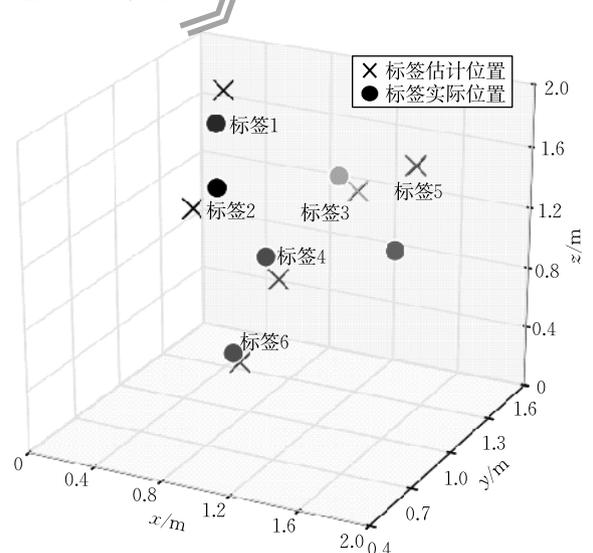


图 13 三维位置感知结果

阅读器移动过程中自身位置的误差、实际环境中多径效应对相位值的干扰以及算法参数设定带来

的影响等是产生定位误差的主要原因. 表 1 中可以看出 3 个坐标方向上, x 轴坐标的值来自全息图谱的计算结果, 其误差基本小于 5 cm, 大部分误差来自 y 轴和 z 轴坐标上. y 轴和 z 轴坐标间由于存在式 (4), 其误差大小通常呈现此消彼长的态势. 在后续研究和实验中, 我们将继续扩大待测目标所处的空间范围并进一步增加目标数量, 重点从抗干扰能力方面提升算法的定位精度.

表 1 标签三维坐标实际值与实验值

实际位置/m	估计位置/m
(0.44, 1.2, 1.71)	(0.431, 1.263, 1.887)
(0.44, 1.2, 1.29)	(0.415, 1.063, 1.236)
(1.19, 1.18, 1.52)	(1.199, 1.308, 1.346)
(0.95, 0.95, 1.1)	(0.978, 1.006, 0.919)
(1.7, 0.95, 1.29)	(1.931, 0.779, 1.970)
(0.95, 0.72, 0.63)	(0.988, 0.719, 0.579)

ABP 方法使 3DinSAR 计算一个目标三维坐标的执行时间缩短至 93 ms (不包含前期相位采样过程). 然而在进一步将本方法应用于移动设备时, 阅读器在获取自身位置时会引入误差, 移动过程中随机产生的孔径情况也更为复杂. 随着需要对孔径进行坐标系旋转、平移等过程, 时间开销会进一步增加. 如何保证移动过程中三维位置的实时更新也是我们下一步关注的重点.

7 结 论

本文给出一种基于多相位差的标签三维定位算法 3DinSAR, 适用于独立可移动的射频识别系统进行实时、高精度的三维位置感知, 且不需提前部署任何辅助设施. 该方法利用多个随机高度上创建的二维全息图谱来取代对全空间的遍历计算, 有效解决了时效问题. 我们利用相位差值给出高程值, 并借助聚类方法 DBSCAN 最终确定三维位置. 另外本文还给出了一种基于标签到达方向的快速计算方法来提高算法的时效性. 本文算法能够适用于手持式读写器或带有射频识别阅读器的室内寻迹或 SLAM 移动平台, 并应用在医疗器械、图书馆、大型仓库管理等领域. 所获得的位置信息也能够为在物联网体系中开展网络资源优化分配或低功耗的研究提供基础.

参 考 文 献

[1] Zhang Shi-Geng, Liu Guang-Liang, Liu Xuan, Wang Jian-Xin. An energy-efficient and fast missing tag detection algorithm

in large scale RFID systems. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(8): 1-12(in Chinese)

(张士庚, 刘光亮, 刘璇, 王建新. 大规模 RFID 系统中一种能量有效的丢失标签快速检测算法. 计算机学报, 2013, 36(8): 1-12)

- [2] Willis K D, Wilson A D. InfraStructs: Fabricating information inside physical objects for imaging in the terahertz region. ACM Transaction on Graph, 2013, 32(4): 1-10
- [3] Miesen R, Ebelt R, Kirsch F, et al. Where is the tag?. IEEE Microwave Magazine, 2011, 12(7): S49-S63
- [4] Miesen R, Kirsch F, Vossiek M. Holographic localization of passive UHF RFID transponders//Proceedings of the 5th IEEE International Conference on RFID. Orlando, USA, 2011: 32-37
- [5] Yang L, Chen Y, Li X, et al. Tagoram: Real-time tracking of mobile RFID tags to high precision using COTS devices//Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Maui, USA, 2014: 237-248
- [6] Wang J, Katabi D. Dude, where's my card?: RFID positioning that works with multipath and non-line of sight. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(4): 51-62
- [7] Hightower J, Want R, Borriello G. SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength. Department of Computer Science and Engineering, University of Washington, Seattle, USA: Technical Report: 2000-02-02, 2000
- [8] Tlili F, Hamdi N, Belghith A. Accurate 3D localization scheme based on active RFID tags for indoor environment//Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications. Nice, France, 2012: 378-382
- [9] Liu T, Yang L, Lin Q, et al. Anchor-free backscatter positioning for RFID tags with high accuracy//Proceedings of the 33rd IEEE International Conference on Computer Communications. Toronto, Canada, 2014: 379-387
- [10] Maneesilp J, Wang C, Wu H, Tzeng N. RFID support for accurate 3D localization. IEEE Transactions on Computers, 2013, 62(7): 1447-1459
- [11] Han J, Zhao Y, Cheng Y, et al. Improving accuracy for 3D RFID localization. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012, 2012(1): 1-9
- [12] Miesen R, Kirsch F, Vossiek M. UHF RFID localization based on synthetic apertures. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10(3): 807-815
- [13] Lin Q, Yang L, Sun Y, et al. Beyond one-dollar mouse: A battery-free device for 3D human-computer interaction via RFID tags//Proceedings of the 34th IEEE International Conference on Computer Communications. Hong Kong, China, 2015: 1661-1669

- [14] Kunkel S, Huang M, Bieber R, Vossiek M. SAR-like localization of RFID tags for non-uniform trajectory//Proceedings of the 2010 European Wireless Technology Conference. Paris, France, 2010: 281-284
- [15] Parr A, Miesen R, Kirsch F, Vossiek M. A novel method for UHF RFID tag tracking based on acceleration data//Proceedings of the 6th IEEE International Conference on RFID. Orlando, USA, 2012: 110-115
- [16] Massonnet D, Feigl K. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics* Richmond Virginia Then Washington, 1998, 36: 441-500
- [17] Ester M, Kriegel H, Sander J, Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise//Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Oregon, Portland, 1996: 226-231
- [18] He Feng, Yang Yang, Dong Zhen, Liang Dian-Nong. Progress and prospects of curvilinear SAR 3-D imaging. *Journal of Radars*, 2015, 4(2): 130-135(in Chinese)
(何峰, 杨阳, 董臻, 梁甸农. 曲线合成孔径雷达三维成像研究进展与展望. *雷达学报*, 2015, 4(2): 130-135)



QIU Lan-Xin, Ph. D. Her major research interests include RFID system and applications, Internet of Things.

HUANG Zhang-Qin, Ph. D. , professor. His major research interests include Internet of Things, embedded system.

LI Da, Ph. D. , lecturer. His major research interests include Internet of Things, embedded system.

Background

In this paper, we focus on 3D location aware in RFID system. Location aware is one of the basic research topics and is an issue that Internet-of-Things users are concerned about. Researchers have proposed many solutions which can be classified primarily into two categories: range measurement and range-free method. Additionally, existing scheme for 2D localization have achieved impressing accuracy. However, in terms of 3D localization, current solutions have some disadvantages on real-time performance, accuracy and feasibility.

To deal more effectively with the 3D location aware issue, in this paper, we propose a 3D localization scheme based on phase interferometric. Our localization method does not need any reference tags and only one portable reader integrated with one antenna is required to move in order to construct the synthetic arrays to implement the locating system. Our main idea is based on 2D naive SAR localization and we further leverage several spatial domain phase difference values as additional information to estimate the target height.

Density-based spatial clustering method DBSCAN and aperture-beam predicting method ABP are also used to improve the locating accuracy and real-time performance. The simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed 3DinSAR scheme. The experimental results from an indoor office environment show a spatial median error of 24 cm with minimum error 6 cm, and the detection time maintain within 95 ms.

The work in this paper has been supported by the Beijing Natural Science Foundation (4122010): energy aware model and application of access systems of the Internet-of-Things. This paper studies on a basic problem in IoT, i. e., location aware, and proposes a 3D location aware scheme based on Interferometric Synthetic Aperture Radar for mobile RFID system. The location information acquired from this work can be employed for the research of no matter optimal resources allocation or energy aware in IoT area, which is a focus in the research supported by the above found.