

基于毫米波感知的小型无源物体定位追踪

王宁¹, 赵科¹, 周安福¹, 马华东¹, 刘建华², 杨宁²

(1. 北京邮电大学计算机学院, 北京 100876; 2. OPPO 广东移动通信有限公司, 北京 100000)

摘要: 由于毫米波的敏感性极强, 物体的微小移动也可以被毫米波所感知, 体现为频谱变化, 借助此优势提出了一种基于毫米波感知的小型无源物体定位追踪方法, 可以实现对目标物体的高精度定位与追踪。与传统的有源物体定位追踪相比, 在无源物体定位追踪中, 由于目标物体无法主动发射信号且目标物体较小, 因此, 需要有效的机制区分、分离目标物体的反射信号和背景环境的反射信号, 采用多种方法去除背景噪声和突发噪声, 实现了良好的定位追踪效果。实验结果表明, 所提方法可以追踪一支笔的运动轨迹, 其平均误差为 0.32 cm。

关键词: 毫米波感知; 无源定位; 小型物体定位追踪; 背景噪声

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00145

Small passive object location tracking based on millimeter-wave sensing

WANG Ning¹, ZHAO Ke¹, ZHOU Anfu¹, MA Huadong¹, LIU Jianhua², YANG Ning²

1. School of Computer Science and Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. OPPO Guangdong Mobile Communication Co., Ltd., Beijing 100000, China

Abstract: Since the sensitivity of the millimeter-wave is very strong, the tiny movement of the object can also be sensed by the millimeter-wave as a spectrum change. With this advantage, a small passive object location and tracking method based on the millimeter-wave sensing was provided, which could achieve the high-precision positioning and tracking of target objects. Compared with the traditional active object localization tracking, the target object could not actively transmit signals and the target object was small in the passive object localization tracking. Thus, an effective mechanism was needed to distinguish and separate the reflected signal of the target object and the reflected signal of the background environment. A variety of methods were used to remove the background noise and the burst noise, and a good positioning tracking effect was achieved. The experimental results show that the proposed method can track the movement of a pen with an average error of 0.32 cm.

Key words: millimeter-wave sensing, passive location, small object positioning and tracking, background noise

1 引言

当前, 信息技术得到了广泛的发展和应用, 并且已成为人们生活的重要组成部分^[1]。近年来, 人均移动设备占有率大幅度提升, 代表智能手机等设

备成为了人们与互联网世界交互的新接口。智能手机与传统的实体鼠标不同, 它具有强烈的便携性需求, 而传统的实体鼠标并不能满足这一需求。因此, 需要新的交互方式来解决该问题。虚拟触控板等应用可以作为一种良好的实体鼠标替代品, 并且虚拟

收稿日期: 2019-10-21; 修回日期: 2020-01-21

通信作者: 王宁, wn1994@bupt.edu.cn

基金项目: 国家科技重大专项 (No.2018ZX03001031); 中央高校基本科研业务费资助项目 (No.2019XD-A13); 国家自然科学基金资助项目 (No.61772084)

Foundation Items: The National Science and Technology Major Project (No.2018ZX03001031), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2019XD-A13), The National Natural Science Foundation of China (No.61772084)

触控板比实体鼠标更直接、易用。与触摸屏相比,虚拟触控板不会对屏幕造成视线遮挡,与实际应用结合后,可以提供更好的用户体验。然而,为了成功实现在不同日常环境下的定位追踪,必须克服重大的技术困难和可用性挑战,定位追踪系统必须具有快速响应能力和高精度的定位和追踪能力。

在无源物体感知领域中,微波作为一种无处不在又不影响人们正常生活的信息媒介,一直备受青睐。在基于微波的无源感知中,使用发射(TX)天线主动发射微波信号,再由接收(RX)天线接收相关物体反射回来的信号,进行一系列的信号处理和分析后,可以实现对目标物体运动状态等的感知。通过选用适当波长的微波,对目标物体的反射信号进行分析,提取其距离信息和角度信息以实现目标物体的定位追踪。传统基于图像的方法(如 Xbox Kinect)会受到环境光的干扰^[2],且存在一定的隐私问题,这些会阻碍其进一步的推广和应用,而基于微波的无源感知能够很好地规避这两个问题。

在2019年8月,国务院发布了指导意见,加快5G等新一代信息基础设施建设,而5G技术是毫米波的重要应用场景。5G空口标准将毫米波段定为无线接入网络的重要载波频段^[3]。随着5G技术的发展和应用,在可预期的未来,毫米波无线电模块将会被广泛安装在手机、可穿戴设备、智能硬件或更广泛的物联网设备上^[4],成为一种主流的通信技术。因此,基于毫米波感知的定位追踪可以方便地作为虚拟触控板等新兴的人机交互方式的实现方法,不需要专门新增硬件模块,只需要通过软件层面上的设计即可实现。现有的基于微波的感知技术通过监测多普勒频移能够准确地识别和分类一组手势^[5],通过机器学习同样可以实现手势识别^[6]。然而,为了满足更广泛的应用场景需求,需要解决基于毫米波的高精度定位和准确追踪两个问题。

由虚拟触控板的应用特点可知,轨迹定位对距离分辨率有很高要求,至少要在亚厘米级以上才能够实现良好的定位。其次,根据应用场景,实际应用的目标物体应当是笔或者手指等小型物体,而小型物体的反射率较小,势必会受到环境物体的严重干扰,对突发噪声干扰进行处理,使得人们能够正确追踪目标物体也是一个严峻的挑战,即要解决准确追踪问题。

2 相关工作

2.1 有源定位追踪

有源定位追踪即对装备有微波发射器的目标进行定位和追踪,目前,该类追踪技术已经得到广泛研究和应用。单独的信号强度RSS(really simple syndication)^[7]或与相位结合^[8]可以用作位置签名。但是物体一位置对应关系的建立通常需要进行场景调查,并且其准确性取决于时间和环境^[9]。路径损耗模型目标定位可以应用在短距离静态环境中^[10],然而,对于无源定位追踪来说,由于存在多径效应,RSS模型会出现较大误差。因此,本文方法依靠相位的变化来实现目标物体的无源定位追踪。

2.2 无源定位追踪

在无源定位追踪领域中,传统雷达主要用于追踪大型运动物体^[11],使用采样频率为吉赫兹级别的无线电波来保证其粒度。相比之下,由于硬件设备的限制,移动设备上配备的毫米波模块的采样频率难以达到吉赫兹级别。就应用场景而言,需要面对近距离的小型物体高精度定位追踪,传统的雷达方法无法解决此问题。

RF-IDraw^[12]使用干涉测量技术来测量多个射频识别(RFID, radio frequency identification)读取器之间的相对相位,实现了厘米级RFID定位。Tagoram^[13]提出了差分增强全息技术,利用RFID读取器提供的反向散射信号的相位值来估计目标的位置。这两种追踪方案需要预先在目标物体上放置RFID标签,因此,不便于在日常生活中进行推广。本文方案不需要对目标物体进行任何改造即可实现高精度的定位追踪,具有更好的易用性。

mTrack^[14]实现了无需对目标物体进行改造就可以进行定位和追踪的实例,但其TX天线和RX天线无法集成到一起,因此,难以在移动设备上移植。在本文方法中,硬件组件可以全部集成到一个小型芯片上,与将来移动设备上配备的毫米波模块更类似,因此,可以直接应用于移动设备中。

2.3 非反射追踪和毫米波的其他应用

无线电断层摄影和成像技术^[15-16]在传感区域周围部署一个传感器网络,通过监测RSS变化的阴影区域来定位物体。本文方法基于物体反射而非遮挡效应,部署单独的传感器节点实现物体的细粒度追踪。Wi-Fi成像^[17]通过天线阵列可以创建监测区域的图像,但分辨率较低。除了定位物体,毫米波

还被用来推断物体的表面曲率和材料^[18]，借此识别感兴趣的目标。

3 方法介绍

首先，对采集的原始信号进行初步处理得到其频谱，通过该频谱理论上可以获得物体相对于毫米波感知节点的距离 R 与到达角 α 。

为了实现高精度的无源追踪，人们将面临 3 个新的技术挑战。首先，来自无关背景物体的反射信号会严重扭曲目标反射信号，影响相位追踪精度。其次，由于小型物体的反射能力较弱，突发性的噪声干扰会严重影响追踪效果。最后，目前的 60 GHz 毫米波硬件仍然存在不可忽略的相位噪声，这也会产生干扰性的相位移动^[14]。为了应对这些挑战，在第 5 节提出了噪声处理方法。

在完成噪声处理后，使用消除误差后的距离 R 与到达角 α ，通过式(1)和式(2)得到物体在二维平面上直角坐标系中的坐标 (x, y) ，达到对物体进行实时定位追踪的目标。总体方法模块如图 1 所示。

$$x = R \sin \alpha \tag{1}$$

$$y = R \cos \alpha \tag{2}$$

4 信号处理

4.1 原始信号阐述

电磁波会被尺寸大于其波长的物体阻挡或者反射，而对于尺寸小于其波长的物体则会绕过，这就限制了波长较长的微波在小型物体定位追踪方面的应用。毫米波信号的波长在毫米级，因此，即使目标物体较小也可以反射毫米

波。在小型物体的无源追踪领域中，这是毫米波的独特优势。

毫米波还具有高精度的优势，60 GHz 毫米波能够感知毫米级别的移动。此外，处理毫米波信号所需的硬件组件（如天线）的尺寸可以设计得很小，可以集成到一个小到几厘米的芯片上，为其在移动设备上的应用提供了可能性，这是毫米波的另一个优势。

本文使用调频连续波（FMCW, frequency modulated continuous wave）雷达作为毫米波感知节点。雷达通过 TX 天线发射线性调频脉冲信号，其信号振幅不变，但频率随着时间呈周期性变化。物体对该线性调频脉冲的反射被 RX 天线接收，其反射信号也是一个线性调频脉冲信号，将发射信号和反射回来的信号合并生成新的信号，使用模数转换器（ADC）提取，放大中频信号并将其转换成数字信号输出。

采用的毫米波设备为 Infineon（英飞凌）公司的 BGT60TR24B 雷达芯片，该雷达在扫频带宽、采样频率、发射功率等方面均可以自行定制。在本文实验中，设置雷达的扫频信号为每 50 ms 完成一次从 57~63 GHz 的扫描。选用距离为 3.5 mm 的 RX₁ 天线、RX₂ 天线同时接收信号，由混频器产生的信号将以 2 MHz 频率进行采样，每个样点进行 8 bit 量化。将雷达完成一次完整扫描所接收的信号称为一帧。

4.2 初步信号处理

RX 天线获得的原始信号是由空间多个物体（除了本文所需追踪的物体外，雷达辐射范围内的

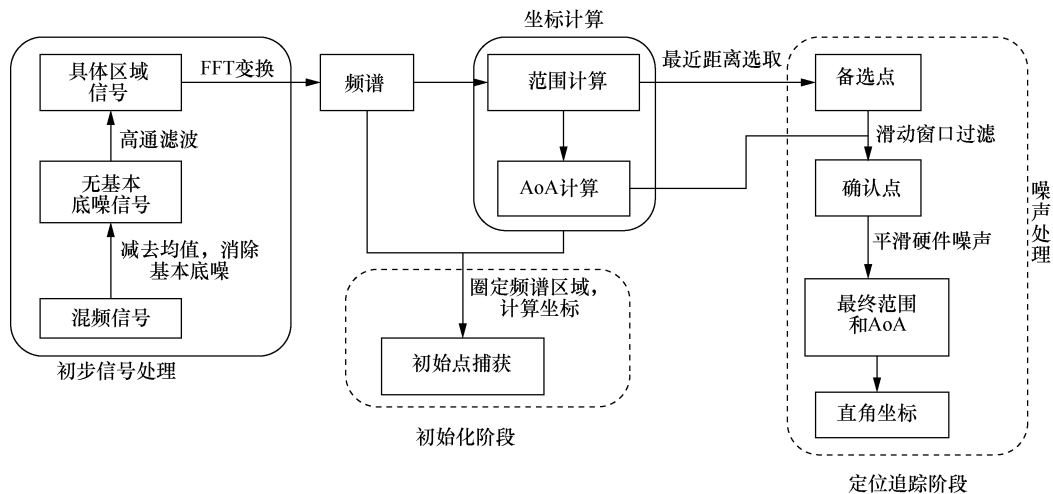


图 1 总体方法模块

其他物体也会反射信号)的反射信号与噪声相叠加的合信号。为了方便之后对物体距离与到达角进行计算,首先对 RX_1 、 RX_2 接收的原始混频信号 $S_{RX_1}(t)$ 与 $S_{RX_2}(t)$ 进行预处理。

信号中的直流分量会在频谱原点产生较大幅度的冲击,由于信号频率和物体与雷达的距离成正比,直流处有响应表示物体与雷达完全贴合,这种情况在现实中很少发生,因此,将信号的直流分量视为干扰。从另一个角度理解,在系统初始化时对被追踪物体所在位置的判断是基于对频谱峰值点的检测,频谱中无关区域的大幅度响应势必会对检测产生影响,因此也要对信号的直流分量进行抑制。

具体来说,对收到的每一帧信号数据减去其平均值,再将其通过 4 阶数字巴特沃斯高通滤波器去除低频分量。其中,巴特沃斯滤波器截止频率的选择取决于所要追踪的物体与雷达的最小距离,假定其最小距离为 10 cm。

综上所述,对被追踪物体所在距离的判断是基于对频谱极值点的检测,因此,在对窗函数的选择中,首先考虑消除旁瓣幅度对相邻主瓣峰值位置的干扰。另外,在所使用的毫米波雷达参数条件下,不同窗函数主瓣宽度的区别对于物体的距离判断不是主要矛盾。基于以上理由,在对滤波后的信号进行快速傅里叶变换(FFT, fast Fourier transform)时选择汉宁窗,并最终得到 RX_1 、 RX_2 接收的信号频谱 $S_{RX_1}(f)$ 、 $S_{RX_2}(f)$ 。在下文中会依次介绍如何从频谱中获得物体与毫米波感知节点的距离 R 和到达角 α 。

4.3 距离计算

毫米波节点接收的反射信号是发送信号的时延信号,该时延由节点和目标物体的距离决定,该时延用数学方法表达为

$$\tau = \frac{2R}{c} \quad (3)$$

其中, c 为光速, R 是节点与物体的距离。

由于信号是连续发送和接收的,所以在发送期间的任何时刻,发射信号和反射信号之间的频率差近似为固定值。在快速 FMCW 雷达中,中频信号受物体移动速度的影响非常小,且在虚拟触控板等实际应用中,目标物体的移动速度均较小,因此,可以忽略目标物体移动速度对中频信号频率的影

响。本文得到的中频信号是包含若干个频率恒定的单音信号的混合信号。假设该中频信号中只有一个单音信号,该单音信号频率为发射信号和反射信号的固定频率差,且该单音信号的初始相位 Φ_0 是发射信号和反射信号的相位之差,即

$$\Phi_0 = 2\pi f_c \tau \quad (4)$$

其中, f_c 为光速的频率,进而可以推导为

$$\Phi_0 = \frac{4\pi R}{\lambda_c} \quad (5)$$

λ_c 为光速的波长,因此,对于一个与节点距离为 R 的物体来说,其单音信号将是一个正弦波,即

$$A \sin(2\pi f_0 t + \Phi_0) \quad (6)$$

其中, f_0 为发射信号和反射信号的固定频率差,根据该单音信号求得节点与物体的距离 R 。 A 为该单音信号的振幅,它决定了在 FFT 频谱中,与该单音信号对应的峰值处的信号强度。

由于噪声的存在,同一时间内可能接收多个反射信号,但每个反射信号的相位不同,即每个反射信号有不同的时延,该时延由物体相对于节点的距离决定。不同的反射信号和发射信号相减之后转化为多个单音信号的混合信号,每个单音信号的频率是固定的。对这个包含多个单音信号的中频混合信号采用 FFT 加以处理,就可以分离出代表各个反射物的单音信号。FFT 处理后产生的频谱具有不同的峰值,每个峰值对应一个在特定距离处的物体。

4.4 角度计算

在水平面上,物体与节点法线的夹角被称为到达角(AoA),到达角如图 2 所示。

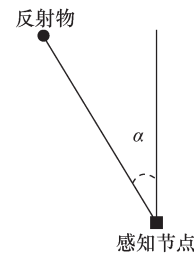


图 2 到达角

距离的微小变化会引起 FFT 峰值的相位变化,基于这个特点可以进行角度计算。这个计算过程至少需要两个 RX 天线, AoA 计算如图 3 所示。

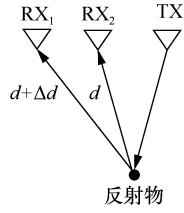


图3 AoA计算

在图3中, 相位变化可以推导为

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda} \quad (7)$$

其中, λ 为光速的波长, 根据基本几何原理则有

$$\Delta d = l \sin \alpha \quad (8)$$

其中, l 为两个 RX 天线之间的距离, 到达角 α 可以通过式(7)得到的 $\Delta\Phi$ 计算得出

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda\Delta\Phi}{2\pi l}\right) \quad (9)$$

5 背景反射和突发噪声处理

5.1 背景反射问题

在无源追踪小型物体时, 背景多径反射的处理是一个独特的挑战。与追踪大目标^[11,19]不同, 小目标的反射往往较弱, 难以将目标物体反射和背景反射从信号强度方面进行区分。因此, 毫米波感知节点的输出信号中混合了背景反射和目标反射, 需要后续进行分离。

在无源追踪中, 只有部分反射信号包含所需信息, 需要对反射信号进行筛选。而有源追踪系统的背景噪声抑制相对简单, 因为信号相位的变化是由基带调制引起的, 基带调制的工作速率(如 RFID^[13])比背景变化快很多。因此, 任何背景反射都可以被认为是相对静态的, 并能被直流滤波器^[20]过滤掉。但是这种方法不适用于相位变化缓慢的无源追踪场景。

对于以上问题, 采用初始区域圈定方法来对目标物体进行初始点捕获, 通过最近距离更新和滑动窗口方法来解决定位追踪期间的背景反射和突发噪声影响。

5.2 初始点捕获

根据上节内容, 由于背景反射的存在, 如果开始就用较大的检测区域会出现多个反射点, 无法进行目标物体的初始定位。因此, 需要在初始阶段对信号采集区域做出限定, 将其划分在较小的一个区域内, 将目标物体放置在该区域内, 这样可以屏蔽检测区域之外的干扰点, 从而捕获目标物体的初始位置, 然后再

将检测区域扩大至正常的物体运动区域。指定运动区域为雷达法线左、右各 45° 的扇形区域内, 其半径范围为 $10\sim 50\text{ cm}$ 。追踪区域和初始区域如图4所示, 两条实线与虚线包围的区域为追踪区域, 设定前5帧为初始阶段, 其用时在 0.5 s 内, 可以快速地捕获目标物体, 然后进入目标物体的追踪阶段。

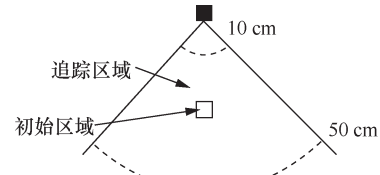


图4 追踪区域和初始区域

5.3 背景反射点处理

所得到的若干组峰值点中包含了所需要的目标物体和背景反射导致的干扰点, 因此, 需要挑选出最可能是目标物体的峰值点, 再由滑动窗口方法判定是否采纳该点, 背景噪声处理算法如算法1所示。

算法1 背景噪声处理算法

输入 $p(R_{t-1}, \alpha_{t-1}), p(R^*, \alpha^*)$

输出 track

while 有 R^*, α^* 输入 do

$R_t = \arg \min_{R \in R^*} |R_{t-1} - R|$

if $|R_{t-1} - R_t| > 0.1$ 或者 $|\alpha_{t-1} - \alpha_t| > 20$ then

continue

else

$p(R_{t-1}, \alpha_{t-1}) \leftarrow (R_t, \alpha_t)$

track 存储 $p(R_{t-1}, \alpha_{t-1})$

end while

算法1分为以下两部分。

1) 最近距离更新: 首先, 初始的 $p(R_{t-1}, \alpha_{t-1})$ 为捕获的初始点的信息, 对于检测的所有峰值点的距离集合 R^* , 找出与 R_{t-1} 差距最小的距离 R_t , α_t 为 α^* 中 R_t 对应的 AoA。

2) 滑动窗口: 防止突发异常噪声, 如突然到来的高强反射物体。突发噪声如果离目标物体较近且反射信号足够强, 则有可能掩盖目标物体的反射点, 导致错误选取到突发噪声点上, 此时需要将该点剔除。具体做法为: 当 $|R_{t-1} - R_t| > 0.1$ 或者 $|\alpha_{t-1} - \alpha_t| > 20$ 时, 则舍弃此次结果; 如果均在窗口阈值之内, 则对 $p(R_{t-1}, \alpha_{t-1})$ 进行更新, 并将 $p(R_{t-1}, \alpha_{t-1})$ 保存在轨迹数组 track 中。

5.4 平滑硬件噪声

由于硬件存在不可忽略的相位噪声，导致连续帧之间的 AoA 会有一定抖动。采用 AoA 最近均值方法很好地平滑了抖动现象，得到优良的定位轨迹，具体如式(10)所示。

$$AoA_t = \left(\sum_{i=t-2}^t \alpha_i \right) / n \quad (10)$$

对于 n 的取值，应做到在尽量小的情况下获得足够好的效果。实验结果表明，应选取 $n=3$ 。由于 3 帧的时间对于触摸板等应用来说只是一瞬间，AoA 变化不大，因此，其误差可以忽略，使用最近均值方法平滑了 AoA 抖动问题。

6 用户实验

对于虚拟触控板类应用，其轨迹是在一个平面上承载的，而且目标物体一般是垂直于轨迹面的笔或者手指，对其进行 2D 跟踪可以将目标物体近似投影为一个点，便于描绘轨迹。因此，选取 2D 场景下的追踪以符合实际应用需求。实验场景如图 5 所示，雷达芯片固定在一个 USB 底座上，在追踪区域内用笔描绘轨迹。

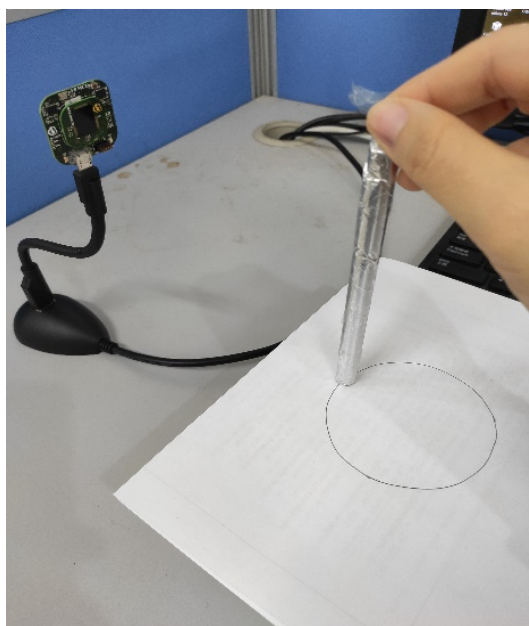


图 5 实验场景

6.1 测试方法

目标物体选取长约为 15 cm、直径约为 1 cm 且包有锡纸的笔，放置一个基底图形，手持笔尖部位在空中描绘这个图形的形状。由于书写轨迹与测量

轨迹之间没有时间同步，因此，将定位误差近似为从测量点到基底图形的投影距离。

圆形轨迹点的投影距离相对易于计算，因此，选取圆形作为基底图形。在此次实验中，每个测量点到基底图形的投影距离为该点到圆心的距离与圆半径之差的绝对值，实时定位轨迹如图 6 所示。其中，蓝色圈为基底图形，红色点为实时监测轨迹，可以看出，轨迹能很好地覆盖基底图形。

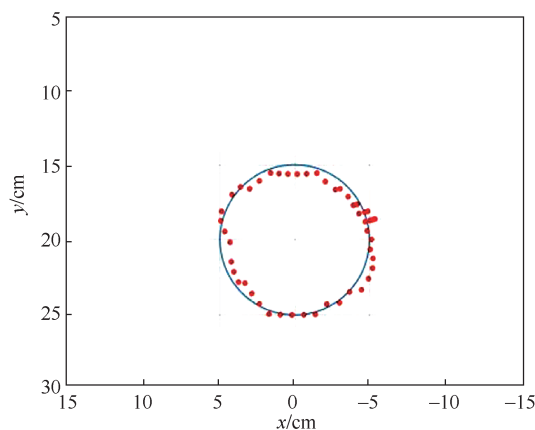


图 6 实时定位轨迹

6.2 测试结果

定位误差累计分布函数 (CDF) 如图 7 所示，可以看出该定位方法的定位误差较小，其平均误差为 0.32 cm。

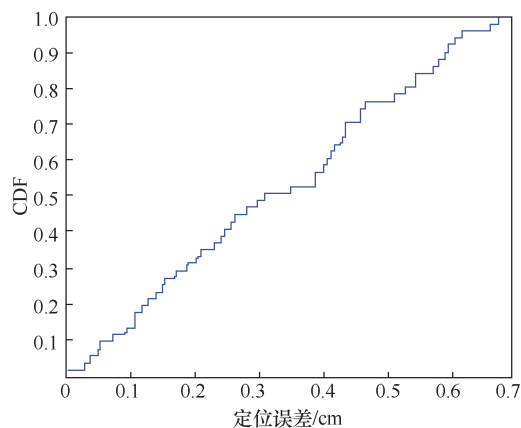


图 7 定位误差累计分布函数 (CDF)

6.3 与已有技术比较

本文方法与已有技术的比较如表 1 所示，虽然追踪误差有一部分影响，但是相比其他方法更易于移植到移动设备上，且在移动设备上的追踪定位场景中，0.1~0.5 m 的范围已能满足需求。

表1 本文方法与已有技术的比较

类别	Tagoram ^[13]	RF-IDraw ^[12]	Tomography ^[15]	mTrack ^[14]	本文方法
追踪类型	有源	有源	无源	无源	无源
信号特征	相位	相位	RSS	相位/RSS	相位
天线数量	≥ 2	8	10~100	≥ 3	≥ 3
追踪距离	1~10 m	2~5 m	3~20 m	1 m	0.1~0.5 m
平均误差	14 mm	49 mm	80 cm~3 m	8 mm	0.32 cm

7 结束语

本文介绍了一种以 60 GHz 毫米波为传感介质的小型物体无源定位追踪方法, 利用 60 GHz 毫米波短波长的特性以及细微的相位变化进行小型物体的定位追踪。并且能以亚厘米级的精度定位追踪一支笔, 达到了良好的精度。随着 60 GHz 毫米波应用的日益普及, 相信本文方法能探索更广泛的移动应用场景。

本文方法实现了单目标定位追踪, 可以自然地引申到多目标追踪, 为实现诸如多点触控等应用场景提供了可能的解决方案。现有的多目标追踪手段大多停留在理论分析及仿真模拟阶段, 对场景的假设一般过于理想, 如假设毫米波感知节点检测范围内有多个点状理想反射体, 若要使其在实际系统中实现多目标追踪, 还需解决如在实际物体复杂的反射面中提取代表点、对临近反射点反射信号的分离、物体运动路径交叉时的身份识别等诸多问题。对于上述问题, 将在未来工作中做进一步探索。

参考文献:

- [1] 孙玉. 我国物联网产业发展趋势[J]. 物联网学报, 2017, 1(3): 1-5.
SUN Y. Development trend of IoT industry in China[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2017, 1(3): 1-5.
- [2] 翟光耀, 陈蓉, 张剑锋, 等. 基于毫米波雷达和机器视觉信息融合的障碍物检测[J]. 物联网学报, 2017, 1(2): 76-83.
ZHAI G Y, CHEN R, ZHANG J F, et al. Tramway obstacles detection based on information fusion of MMV radar and machine vision[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2017, 1(2): 76-83.
- [3] 叶佳, 罗健威, 郭仪, 等. 面向毫米波无线接入网的数字型光载无线技术[J]. 物联网学报, 2019, 3(4): 17-24.
YE J, LUO J W, GUO Y, et al. Digital radio over fiber transmission technique for millimeter-wave radio access network[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2019, 3(4): 17-24.
- [4] 郭贺铨. 物联网技术与应用的新进展[J]. 物联网学报, 2017, 1(1): 1-6.
WU H Q. Technology and application progress on Internet of things[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2017, 1(1): 1-6.
- [5] PU Q, GUPTA S, GOLLAKOTA S, et al. Whole-home gesture recognition using wireless signals[C]//ACM Sigcomm 2013 Conference. ACM, 2013, 43(4): 485-486.
- [6] MELGAREJO P, ZHANG X, RAMANATHAN P, et al. Leveraging directional antenna capabilities for fine-grained gesture recognition[C]//ACM UbiComp. ACM, 2014: 541-551.
- [7] WANG H, SEN S, ELGOHARY A, et al. No need to war-drive: unsupervised indoor localization[C]//ACM MobiSys. ACM, 2012: 499-500.
- [8] SEN S, RADUNOVIC B, CHOUDHURY R R, et al. You are facing the Mona Lisa: spot localization using PHY layer information[C]//ACM MobiSys. ACM, 2012: 183-196.
- [9] LIU H, GAN Y, YANG J, et al. Push the limit of Wi-Fi based localization for smartphones[C]//ACM MobiCom. ACM, 2012: 305-316.
- [10] FANG H. 60 GHz RSS localization with omni-directional and horn antennas[J]. Environmental Pollution & Control, 2010, 32(8): 56-61.
- [11] ADIB F, KABELAC Z, KATABI D, et al. 3D tracking via body radio reflections[C]//USENIX NSDI. 2014: 317-329.
- [12] WANG J, VASISHT D, KATABI D. RF-IDraw: virtual touch screen in the air using RF signals[C]//ACM Sigcomm. ACM, 2014: 1-4.
- [13] YANG L, CHEN Y, LI X Y, et al. Tagoram: real-time tracking of mobile RFID tags to high precision using COTS devices[C]//ACM MobiCom. ACM, 2014: 237-248.
- [14] WEI T, ZHANG X Y. MTrack: high-precision passive tracking using millimeter wave radios[C]//ACM MobiCom. ACM, 2015: 117-129.
- [15] PATWARI N, BREWER L, TATE Q, et al. Breathing: a wireless network that monitors and locates breathing in a home[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(1): 30-42.
- [16] WEI B, VARSHNEY A, HU W, et al. DRTI: directional radiotomographic imaging[C]//Proceedings of the 14th International Conference on Information Processing in Sensor Networks. IEEE, 2015: 166-177.
- [17] HUANG D, NANDAKUMAR R, GOLLAKOTA S. Feasibility and limits of Wi-Fi imaging[C]//ACM SenSys. ACM, 2014: 266-279.
- [18] ZHU Y Z, ZHANG Z B, ZHAO B Y, et al. 60 GHz mobile imaging radar[C]//HotMobile'15. 2015: 75-80.
- [19] XU C, FIRNER B, MOORE R S, et al. SCPL: indoor device-free multi-subject counting and localization using radio signal strength[C]//IPSN'13. IEEE, 2013: 79-90.
- [20] NIKITIN P V, MARTINEZ R, RAMAMURTHY S, et al. Phase based spatial identification of UHF RFID tags[C]//IEEE International Conference on RFID. IEEE, 2010: 102-109.

[作者简介]



王宁（1994- ），男，山西太原人，北京邮电大学计算机学院硕士生，主要研究方向为物联网系统和毫米波感知等。



马华东（1964- ），男，河南南阳人，北京邮电大学网络技术研究院执行院长、智能通信软件与多媒体北京市重点实验室主任，主要研究方向为物联网与传感网、多媒体理论与系统等。



赵科（1997- ），男，浙江绍兴人，北京邮电大学本科毕业生，主要研究方向为雷达定位和认知无线电等。



刘建华（1979- ），女，山东青岛人，OPPO广东移动通信有限公司高级通信标准工程师，主要研究方向为 5G 蜂窝通信和毫米波感知等。



周安福（1981- ），男，河南信阳人，北京邮电大学计算机学院教授、博士生导师，主要研究方向为物联网系统和毫米波感知等。



杨宁（1981- ），男，陕西西安人，OPPO研究院标准研究部部长、教授级高级工程师，主要研究方向为蜂窝通信和毫米波系统等。