



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目：一种低成本毫米波雷达的室内自定位方法
作者：柳景斌, 王泽民, 吕轩凡, 李维, 尹斐, 仇宏煜
DOI: 10.13203/j.whugis20210593
收稿日期: 2022-06-21
网络首发日期: 2022-07-18
引用格式: 柳景斌, 王泽民, 吕轩凡, 李维, 尹斐, 仇宏煜. 一种低成本毫米波雷达的室内自定位方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20210593>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20210593

引用格式：

柳景斌, 王泽民, 吕轩凡, 等. 一种低成本毫米波雷达的室内自定位方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210593 (LIU Jingbin, WANG Zemin, LÜ Xuanfan, et al. An Indoor Ego-Localization Method for Low Cost Millimeter Wave Radar[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210593)

一种低成本毫米波雷达的室内自定位方法

柳景斌¹ 王泽民¹ 吕轩凡¹ 李维¹ 尹斐¹ 仇宏煜¹

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉, 430079

摘要：毫米波雷达(mmWave radar)已广泛应用于汽车工业等领域,但其用途主要局限于障碍物或特定任务的环境感知方面。目前将低成本单芯片毫米波雷达用于导航定位领域的研究还较少。本文首先研究了毫米波雷达的原始数据处理原理,然后设计了一种基于低成本单芯片毫米波雷达的室内自定位方法。该方法利用DBSCAN(Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)算法提取质心特征点,通过最近邻准则匹配质心特征点对,构造非线性优化函数以及使用LM(Levenberg-Marquardt)方法求解定位结果。实验证明利用低成本单芯片毫米波雷达可以实时进行室内导航定位解算。在静止条件下,其平均水平定位精度可达亚厘米级(均值为0.83cm,标准差为0.47cm)。在动态条件下,其绝对轨迹误差可达0.66m,平均航向角误差可达4.58°,可以说明低成本毫米波雷达自定位的可行性。本文最后讨论了低成本毫米波雷达在导航定位中存在的问题以及可行的研究思路。

关键词：室内定位;毫米波雷达数据处理;应急救援定位;毫米波雷达室内定位

中图分类号：P228

文献标志码：A

日常生活中,人们在室内活动的时间高达70%以上,对室内基于位置的服务(Location Based Service, LBS)需求越来越大,而高精度的室内定位则是各种LBS应用的基础。

目前室内定位的主流技术包括WiFi定位,蓝牙定位,超宽带(Ultra Wideband, UWB)定位和音频定位等^[1-3],这些方法通常需要在场景中提前布设大量基站才能定位。行人航迹推算(Pedestrian Dead Reckoning, PDR)不需要提前布设基站,只依靠IMU传感器即可定位,但定位结果不够精确^[4]。基于视觉传感器或激光雷达传感器的同时定位与地图构建技术(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)^[5-9]作为近年来机器人领域的研究热点,也可以在室内进行定位,但是

视觉方法在纹理缺失,光照不均匀等条件下容易失败,激光雷达传感器则由于较高的价格使得应用范围受限。

毫米波雷达是一种非接触式感应技术,通过发射和接收波长为毫米量级的调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)信号,可以检测出反射信号的物体并提供这些物体的距离、速度和角度信息。相比视觉,激光雷达等用于自定位的现有传感器,毫米波雷达具有很大的天然优势,包括亚毫米级别的距离探测精度,在雨雪,大雾,沙尘,黑暗强光等极端环境条件下都能有效工作,价格便宜,且已广泛应用于汽车领域的高级驾驶辅助系统(Advanced Driving Assistance System, ADAS)中等。

毫米波雷达在传统应用中主要用于环

项目资助：国家自然科学基金(41874031, 42111530064)

通讯作者：柳景斌, 博士, 教授, 主要从事室内和室外定位、智能手机导航、室内移动测绘和GNSS/INS/SLAM集成技术研究。jingbin.liu@whu.edu.cn

通讯作者：王泽民, 博士生。zeminwang@whu.edu.cn

收稿日期：2022-06-21

境感知任务,近年来利用车载机械旋转式毫米波雷达进行导航定位逐渐成为研究热点。例如牛津大学 2020 年发布了车载毫米波雷达公开数据集^[10],主要包括了不同天气,交通和光照条件下的各种场景。其使用 Navtech CTS350-X 机械旋转式毫米波雷达,可提供全向扫描雷达的原始功率谱。毫米波雷达频率为 76GHz,采集频率为 4Hz,每旋转一周可观测 400 次,最远距离为 163 m,最大距离分辨率为 4.38 cm,波束宽度为 1.8°,最大角分辨率为 0.9°。Sarah^[11]于 2018 年提出了一种车载毫米波雷达的自定位方法,其主要贡献在于首次提出了一种基于毫米波雷达数据的路标提取算法,然后通过一元描述和扫描匹配算法进行相对运动估计。其最终的定位精度不低于视觉里程计且具有在任意场景(包括 GNSS/INS 失效场景)可用的优点。2019 年, Sarah^[12]在之前工作基础上通过图匹配方式改进了车载毫米波雷达的自定位方法,使得在任意场景下扫描匹配精度可以达到 5.2cm 平移误差和 0.09° 角度误差。Hong 等^[13]在 2020 年提出了一种基于车载毫米波雷达的大尺度 SLAM 方法,其主要通过借鉴视觉 ORB-SLAM^[5,6]的定位

框架,通过添加先验运动约束等策略来提高车载毫米波雷达的自定位精度。Pou-Chun^[14]于 2021 年提出了一种基于 NDT 的车载毫米波雷达计。Keenan^[15]于 2021 年提出了一种针对车载毫米波雷达运动畸变和多普勒效应的补偿方法。总之,已经有越来越多的学者正在研究基于车载毫米波雷达的自定位方法,但是采用低成本单芯片毫米波雷达进行室内定位导航的相关研究还非常少。Zheng 等^[16]在 2021 年提出了一种使用 3 个毫米波雷达作为基站通过三角定位来给场景中的机器人定位的方法。Wang 等^[17]在 2021 年提出了一种基于相关扫描匹配(Correlative Scan Matching, CSM)的毫米波雷达室外点云匹配定位方法。

与上述方法不同,本文采用低成本单芯片毫米波雷达进行室内定位,主要工作包括:

- 1) 详细阐述了毫米波雷达用于自定位的原始数据处理原理。
- 2) 设计了一种基于低成本单芯片毫米波雷达的室内自定位方法。
- 3) 通过仿真实验和真实场景实验验证了低成本单芯片毫米波雷达用于室内导航定位的可行性与精度评估。

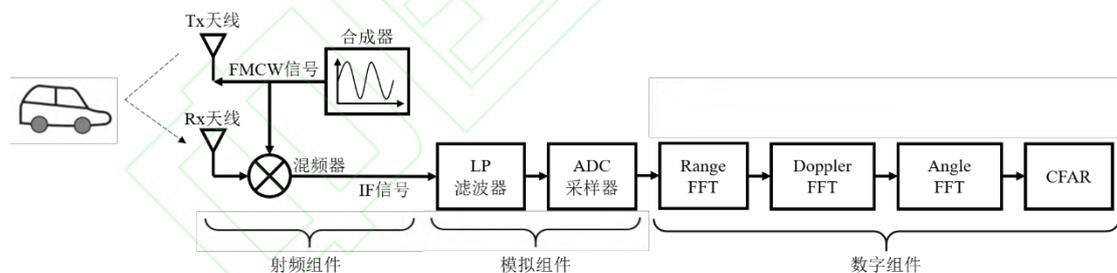


图 1 毫米波雷达工作流程图

Fig.1 mmWave radar workflow

1 毫米波雷达数据处理原理

毫米波雷达硬件系统一般包括微控制器(MCU)、数字信号处理器(DSP)和模数转换器(ADC)等数字组件,时钟等模拟组件,以及发射(Tx)和接收(Rx)等射频(RF)组件。最新的毫米波雷达技术已将所有组件集成到一片毫米波雷达芯片内部,具有体积小,功耗低,价格便宜等优势。与传统的周期性短脉冲雷达不同,目前毫米波雷达普遍采用

调频连续波(FMCW)技术,通过连续发射和接收调频信号,然后对接收信号进行处理,可以获得反射信号物体的精确距离,速度和角度等信息。如图 1 所示为毫米波雷达的工作流程图。首先,合成器生成 FMCW 信号,经 Tx 天线发射,当信号被遮挡目标反射回来后由 Rx 天线捕获,然后混频器将 Rx 信号与 Tx 信号合成为中频(Intermediate Frequency, IF)信号,经过低通滤波和模数转换,最后进行数字信号处理输出遮挡目标的距离,速度和角度。其中数字信号处理采用的算法主要包括距离傅里叶变换(Range

Fast Fourier Transformation), 多普勒傅里叶变换(Doppler Fast Fourier Transformation), 角度傅里叶变换(Angle Fast Fourier Transformation)以及恒虚警算法(Constant False Alarm Rate Detector, CFAR)等, 可分别用于估计被测物体的距离, 速度, 角度信息以及目标检测等。

1.1 毫米波雷达测距原理

在毫米波雷达系统中一般采用调频连续波(FMCW)技术发射电磁波信号, 即发射的电磁波信号的频率会随时间线性变化, 所以这种电磁波信号也称作线性调频脉冲, 如图2所示为毫米波雷达所使用的线性调频脉冲信号, 纵轴为振幅, 横轴为时间。

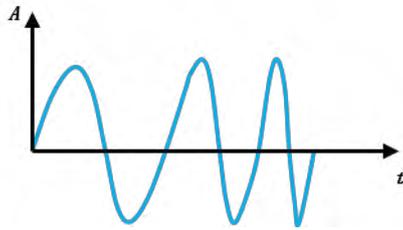


图2 线性调频脉冲信号(振幅-时间图)

Fig.2 Chirp signal(Amplitude-time plot)

将同一线性调频脉冲信号以频率-时间图表示, 结果如图3所示。该线性调频脉冲起始频率为 77 GHz, 终止频率为 81 GHz, 带宽 $B=4$ GHz, 周期 $T_c=325\mu\text{s}$, 斜率

$$S = \frac{B}{T_c}, \text{ 反映了频率的变化速率。}$$

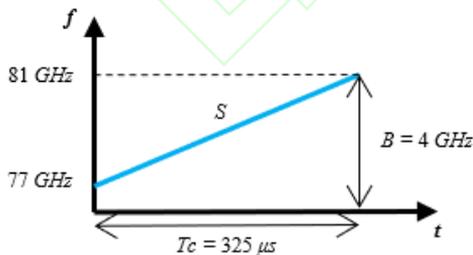


图3 线性调频脉冲信号(频率-时间图)

Fig.3 Chirp signal(frequency-time plot)

当 Rx 天线捕获到反射信号后, 由混频器将 Tx 信号和 Rx 信号合并生成一个新的中频(IF)信号。其频率等于 Tx 信号和 Rx 信号的瞬时频率差, 相位为两信号的瞬时相

位差。如图4所示, 红色线条为信号合成器生成的线性调频脉冲信号, 由 Tx 天线发射, 当信号被物体遮挡后返回, 经时间 τ 被 Rx 天线捕获, 捕获信号为图中蓝色线条。此时, 发射信号和返回信号由混频器处理生成中频信号 IF, 其带宽为 B_{IF} 。已知线性调频脉冲信号的斜率为 S , 返回时间为 τ , 则中频信号为 $B_{IF} = S * \tau$ 。所以对中频信号进行采样, 用 FFT 估计出中频信号频率, 即可求出返回时间 τ , 进而求出距离 $d = \frac{c * \tau}{2}$ 。

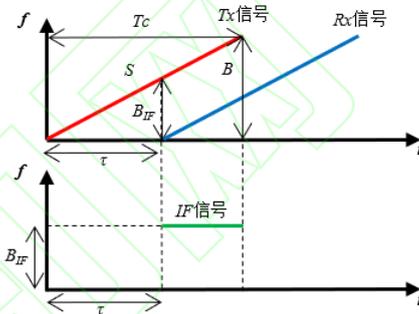


图4 中频信号示意图

Fig.4 IF signal plot

1.2 毫米波雷达测速原理

毫米波雷达测速原理为 Doppler FFT。因为中频信号的相位为 Tx 信号和 Rx 信号的瞬时相位差, 所以在 τ 时刻, 中频信号的相位 $\varphi=2\pi f_c \tau$, 又因为 $f_c = \frac{c}{\lambda}$, $\tau = \frac{2d}{c}$, 其中 λ 为波长, c 为光速, 所以 $\varphi = \frac{4\pi d}{\lambda}$ 。

此时若物体以径向速度 v 变化, 则在一个线性调频脉冲(chirp)期间, 该速度会引起物体到毫米波雷达的距离增加 δd , 从而引起毫米波雷达接收下一个线性调频脉冲的时间推迟 $\delta \tau$, 最终使得中频信号的相位发生 $\delta \varphi$

$$\text{的变化, 且 } \delta \varphi = 2\pi f_c \delta \tau = \frac{4\pi \delta d}{\lambda} = \frac{4\pi v T_c}{\lambda}。$$

所以当采用距离 FFT 求出物体的距离后, 在距离 FFT 峰值的相位序列继续做 FFT 可求得该物体所对应中频信号的相位变化, 如图5

所示,最后通过 $v = \frac{\lambda \delta \varphi}{4\pi T_c}$ 即可求出物体的径向速度。

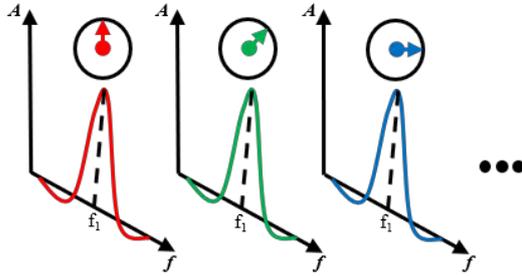


图 5 Doppler FFT 示意图
Fig.5 Doppler FFT plot

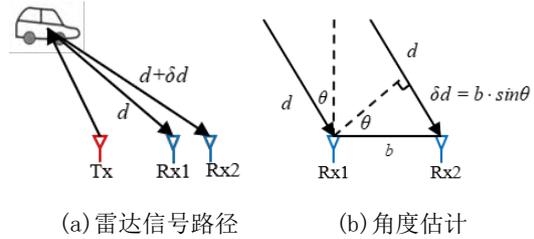
1.3 毫米波雷达角度估计原理

毫米波雷达角度估计最少需要使用两个接收天线。如图 6 所示, Tx 天线发射的线性调频脉冲经物体反射, 分别被 Rx 天线 1 和 Rx 天线 2 接收, 其对应的距离分别为 d 和 $d + \delta d$ 。假设物体相对毫米波雷达的方位角为 θ , Rx 天线 1 和 Rx 天线 2 的基线距离为 b , 则 $\delta d = b \cdot \sin \theta$ 。跟毫米波雷达测速原理中分析一样, 物体到毫米波雷达的距离发生变化会引起该物体所对应的中频信号相位发生变化。所不同的是, 在测速原理中, 距离在发射信号阶段和接收信号阶段均发生变化; 而角度估计中, 距离仅在接收阶段发生变化。所以在角度估计原理中, 中频信号的相位变化

$$\delta \varphi = 2\pi f_c \delta \tau = \frac{2\pi \delta d}{\lambda} = \frac{2\pi b \sin \theta}{\lambda}$$

当采用 Doppler FFT 求出物体的速度后, 在接收天线维度继续做 FFT 即可求得该物体因角度原因引起的中频信号相位变化 $\delta \varphi$, 进而通

过 $\theta = \arcsin \frac{\lambda \delta \varphi}{2\pi b}$ 即可求出物体的角度信息。



(a) 雷达信号路径 (b) 角度估计
图 6 角度估计示意图

Fig.6 Angle of arrival of objects

1.4 毫米波雷达目标检测原理

从毫米波雷达的实际信号中提取目标时, 环境杂波和噪声干扰对目标检测的结果具有很大影响。为了降低环境杂波和噪声干扰的不利影响, 在目标检测时通常会采用恒虚警算法(CFAR), 使检测结果的虚警概率保持恒定, 即在恒定的虚警概率条件下, 使得正确检测的概率最大。恒虚警算法本质上是一种统计假设检验, 通过对特定信号的统计来判断当前信号的显著性。如图 7 所示, 在毫米波雷达的距离-多普勒图中, 当前检测信号为 y , 训练单元集合为 $X = \{x_1, \dots, x_n\}$,

虚警因子为 s , 则检测门限

$$y' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i + s$$

若当前值 $y \geq y'$, 则认为满足假设检验 H_1 : 目标存在; 若当前值 $y < y'$, 则认为不满足假设检验 H_0 : 目标不存在。其中通过虚警因子 s 可以控制系统的虚警概率, 减少检测结果的假阳性, 从而避免系统误报。

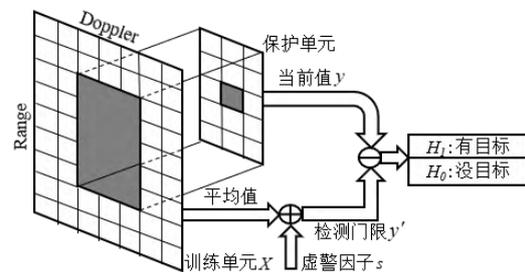


图 7 CFAR 目标检测示意图

Fig.7 CFAR object detection plot

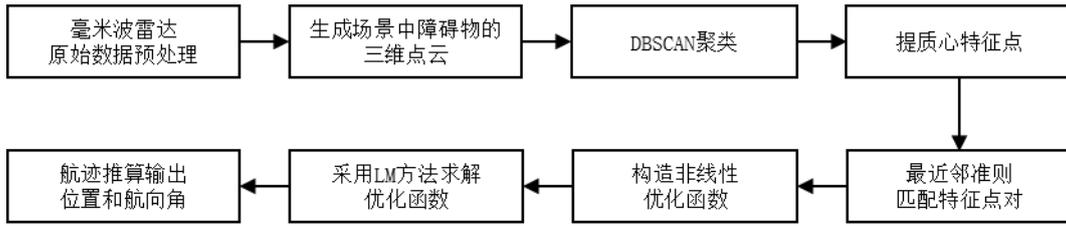


图 8 毫米波雷达自定位算法流程图

Fig.8 mmWave radar based ego localization workflow

2 毫米波雷达自定位方法

采用毫米波雷达自定位的算法流程如图 8 所示。当毫米波雷达原始数据经过处理后，可以得到检测目标的三维点云信息。本文针对毫米波雷达目标点云的特点，采用 DBSCAN^[18] 聚类算法提取目标点云的质心特征点，通过最近邻准则匹配特征点对，然后使用非线性优化框架来求解毫米波雷达相邻帧的相对运动信息，最后通过航位推算求出毫米波雷达的实时平面位置和航向角信息。

2.1 特征点提取

因为毫米波雷达输出的三维点云数据分布在有物体的地方点云比较密集，而在没有物体的地方会出现不稳定的噪声，所以本文采用 DBSCAN 聚类算法来提取物体的质心特征点，并且去除不稳定的噪声点云。在毫米波雷达数据的聚类问题上，DBSCAN 相对于 K-means 等其他聚类算法具有很大的优势。首先，DBSCAN 不需要事先确定聚类的类别个数；其次 DBSCAN 是基于密度的空间聚类算法，可以发现任意形状的簇类；另外，DBSCAN 还可以识别出数据中的不稳定噪声点。DBSCAN 的核心参数包括两个：聚类半径 ϵ 以及聚类半径内的最小点数 n ，其算法流程如算法 1 所述，当 DBSCAN 聚类完成后，求取簇 $\{C_1, \dots, C_j\}$ 的聚类中心作为本簇的质心特征点。

算法 1: 基于毫米波雷达点云的 DBSCAN 聚类算法

输入: 点云数据样本集 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$,

聚类半径 ϵ 以及聚类半径内的最小点数 n 。

输出: 聚类完成后的簇集合 C 。

1: 初始化聚类簇集合为空集 $C = \emptyset$ ，标记所有点云样本的状态为未处理。

2: 在未处理的点云样本中任取点

$\{p_i, 1 \leq i \leq m\}$ ，检查其聚类半径 ϵ 范围内的点云个数是否大于聚类半径内的最小点数

n 。若是，则生成新簇 $\{C_j, j \geq 1\}$ ，将该点 p_i

以及聚类半径 ϵ 范围内的所有点都加入新

簇 C_j 中，且将 p_i 点的状态标记为已处理。若

否，则将 p_i 加入噪声簇 C_0 中。

3: 在簇 C_j 中任选未处理的点 p_k ，检查其聚

类半径 ϵ 范围内的点云个数是否大于聚类半径内的最小点数 n 。若是，则将聚类半径

ϵ 范围内的所有点也加入簇 C_j 中，且将 p_k 点

的状态标记为已处理。

4: 重复步骤 3，直到簇 C_j 中的所有点的状态都为已处理。

5: 重复步骤 2-4，直到点云数据样本集 P 中的所有点都分入了某个簇中。

6: 输出最终聚类完成后的簇集合

$C = \{C_0, C_1, \dots, C_j\}$ 。

2.2 相对运动估计

当提取出毫米波雷达相邻两帧的质心特征点后，通过最近邻准则匹配质心特征点对，然后构造并求解非线性优化函数即可估计出毫米波雷达在相邻两帧间的旋转矩阵

R 和平移向量 t 。本文使用非线性优化函数为：

$$\arg \min_{R,t} \sum \|p' - (R * p + t)\|^2 \quad (1)$$

其中 p 和 p' 分别为相邻两帧的质心特征点。使用列文伯格-马夸尔特 (Levenberg-Marquardt, LM)^[19] 方法进行非线性优化求解即可得到毫米波雷达相邻帧的相对运动信息。LM 方法在高斯牛顿法的基础上对 Δx 的取值添加了约束，所以在一定程度上修正了高斯牛顿法的病态问题。推导过程如下，设优化目标函数为：

$$\begin{aligned} \min_{\Delta x} \frac{1}{2} \|f(x_k) + J^T \Delta x\|^2 \\ \text{s.t. } \|D \Delta x\|^2 \leq \Delta \end{aligned} \quad (2)$$

通过拉格朗日乘数法，可将目标函数变为无约束优化问题：

$$\min_{\Delta x} \frac{1}{2} \|f(x_k) + J^T \Delta x\|^2 + \frac{\mu}{2} \|D \Delta x\|^2 \quad (3)$$

为了求目标函数的最小值，可将目标函数展开，然后对 Δx 求导，再令导函数为 0 可得：

$$(J^T J + \mu D^T D) \Delta x = -J^T f(x_k) \quad (4)$$

定义 $\rho = \frac{f(x_k + \Delta x) - f(x_k)}{J^T \Delta x}$ ，则通过

ρ 可以动态调整 μ 的大小，以此来动态调整 Δx 的取值范围。调整 μ 的一般经验为：

$$\begin{cases} \mu_{\text{new}} = 0.5 \mu_{\text{old}} & \rho > 0.75 \\ \mu_{\text{new}} = \mu_{\text{old}} & 0.25 < \rho < 0.75 \\ \mu_{\text{new}} = 2 \mu_{\text{old}} & \rho < 0.25 \end{cases} \quad (5)$$

3 实验分析

为了验证算法的有效性和正确性，本节设计了仿真实验和真实场景实验来对毫米波雷达原始数据处理与自定位算法进行验证。其中真实实验包括毫米波雷达在静止条件下的自定位实验和动态条件下 3 个不同场景的自定位实验。

3.1 原始数据处理仿真验证

本节通过仿真实验验证毫米波雷达原始数据处理流程的有效性。仿真实验假设在毫米波雷达距离 $r_0 = 30 \text{ m}$ 处有一移动目标沿毫米波雷达径向方向以 $v = 10 \text{ m/s}$ 匀速运动。设置毫米波雷达的参数：起始频率为 77 GHz，最远探测距离为 200 m，距离分辨率为 1 m，ADC 采样数为 1024，每帧线性调频脉冲数为 128。

根据距离分辨率可得线性调频脉冲的带宽 $B = \frac{c}{2\delta r}$ 。为了频域信号可以被准确识别，

设置线性调频脉冲时间 $T_c = 10 * \frac{r_{\text{max}}}{c}$ 。所以

线性调频脉冲的斜率 $s = \frac{B}{T_c}$ 。当有了毫米波

雷达参数和移动物体参数后，通过算法 2 处理仿真数据即可得到物体的距离和速度信息，其结果如图 9 所示。从图中可以看出在信号最大位置处的距离为 30.56 m，速度为 10.24 m/s，与仿真设置参数相似。设置 CFAR 训练单元大小为 12×5 ，保护单元大小为 4×3 ，虚警因子 $s=1.5$ ，然后在图 9 数据中提取目标物体，其结果如图 10 所示。从图中可以看出位于最大信号处的仿真物体被准确检测出来，而其他位置处的噪声目标则都被屏蔽掉了。

算法 2：仿真数据处理算法

输入： 毫米波雷达参数，移动物体的仿真距离和仿真速度。

输出： 移动物体的距离估计和速度估计。

1: 生成 t 时刻 FMCW 发射信号

$$T(t) = \sin \left(2\pi \left(ft + \frac{st^2}{2} \right) \right)$$

2: 按匀速模型计算 t 时刻移动目标距离毫米波雷达的距离 $r(t) = r_0 + vt$ 。

3: 根据 t 时刻移动目标距离毫米波雷达的距离计算返回信号的传播延迟 $t_d = \frac{2 * r(t)}{c}$ 。

4: 计算接收信号

$$R(t) = \sin\left(2\pi\left(f(t-t_d) + \frac{s(t-t_d)^2}{2}\right)\right)$$

5: 用 t 时刻的发射信号 $T(t)$ 和接收信号 $R(t)$ 计算中频信号 $I(t) = T(t) * R(t)$ 。

6: 将中频信号整理为行列分别为 ADC 采样数和每帧线性调频脉冲数的二维矩阵。

7: 在中频信号的每一列进行 Range FFT 即可求出物体所在距离信息。

8: 在 Range FFT 结果的行向量上进行 Doppler FFT 即可求出物体的速度信息。

9: 最后在 Range-Doppler 图上通过 CFAR 提取目标物体。

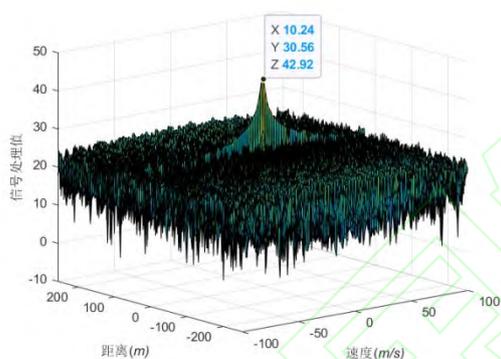


图9 距离-速度图

Fig.9 Range-velocity plot

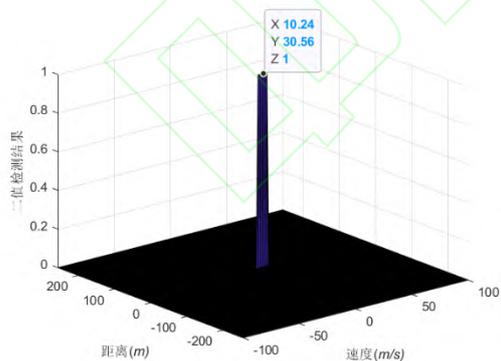


图10 CFAR 目标提取结果

Fig.10 CFAR object detection result

3.2 真实场景室内自定位实验

为了验证毫米波雷达在室内环境的自定位精度,本节分别设计了静止条件和动态条件下两组实验并分析了定位结果精度。本

实验的毫米波雷达传感器采用 TI 公司的 AWR1843 BOOST 评估板,外观如图 11 所示。其上搭载的毫米波雷达芯片 AWR1843 中集成了三个处理器,包括一个 ARM 核心,型号为: Arm-Cortex R4F 200MHz; 一个 DSP 核心,型号为: C674x DSP 600MHz 以及一个雷达硬件加速器。AWR1843 单芯片具有 3 个发射天线以及 4 个接收天线,可调制频率范围是 76-81 GHz,其中射频带宽为 4 GHz(77-81 GHz),最大采样速率为 25 Msps,中频带宽为 10 MHz。水平视场角为 $\pm 60^\circ$,垂直视场角为 $\pm 20^\circ$ 。



图11 AWR1843 BOOST 评估板

Fig.11 AWR1843 BOOST

实验使用电脑 CPU 为 Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz, 设置毫米波雷达参数: 最大不模糊距离为 9.02 m, 距离分辨率为 0.044 m, 最大径向速度为 1 m/s, 径向速度分辨率为 0.13 m/s, 数据采集帧为 10 fps。在算法中设置毫米波雷达有效数据范围为 [0.5 m, 9.02 m]。

3.2.1 静止条件下自定位实验

静止条件下毫米波雷达的自定位实验场景和实验设备如图 12 所示。



图12 实验场景和实验设备

Fig.12 Experimental Scene and Equipment

将毫米波雷达静止放置,通过采集毫米

波雷达数据，利用 DBSCAN 算法提取质心特征点，然后通过相邻帧的质心特征点对，利用非线性优化函数进行相对运动估计即可得到毫米波雷达的自定位结果。图 13 显示了毫米波雷达采集的原始数据和 DBSCAN 算法提取的质心特征点。其中，蓝色点为原始毫米波雷达数据，红色圆为 DBSCAN 算法提取的质心特征点。

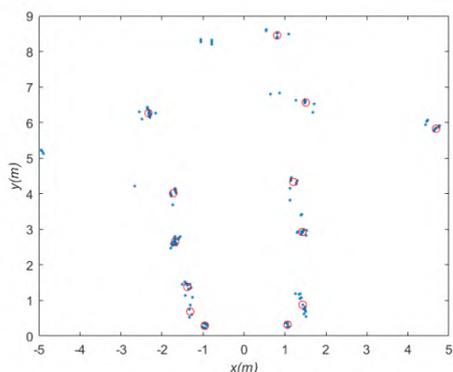
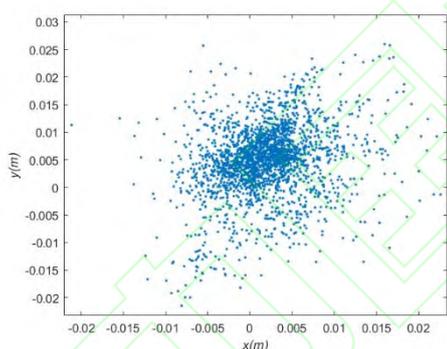


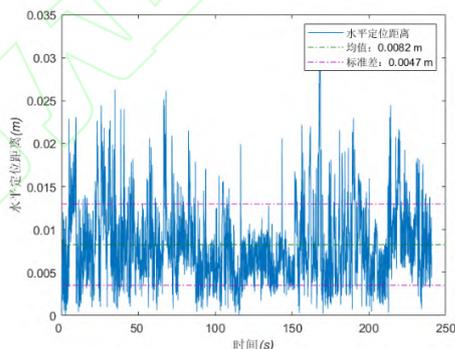
图 13 毫米波雷达原始数据与质心特征点

Fig.13 mmWave Radar Origin Data and Features

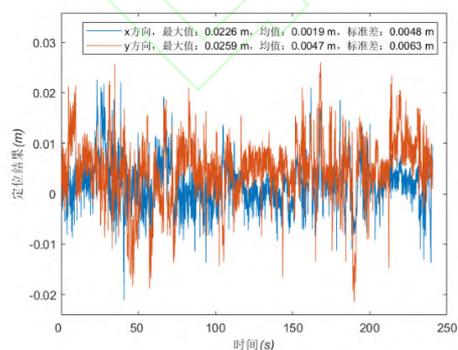
图 14 为静态条件下，毫米波雷达的定位结果，其中图 14 (a) 为水平定位结果，图 14 (b) 为水平定位到原点的平面距离结果，其均值为 0.83cm，标准差为 0.47cm。图 14 (c) 显示了定位结果分别在 x 方向和 y 方向的分布情况。图 14 (d) 显示了定位结果中的航向分布情况。总数据长度为 240s，平均每帧处理时间为 0.08ms。



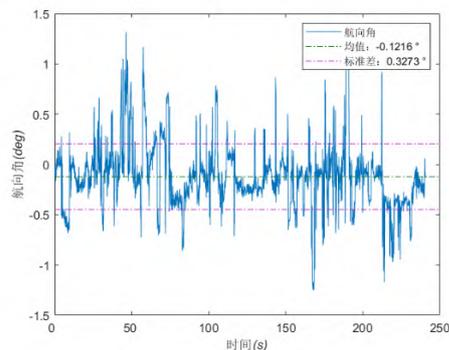
(a) 水平定位结果显示



(b) 水平定位距离结果



(c) x 和 y 方向定位结果



(d) 航向角定位结果

图 14 静止条件下毫米波雷达自定位结果

Fig.14 mmWave Radar Ego Localization under the Static Conditions

3.2.2 动态条件下自定位实验

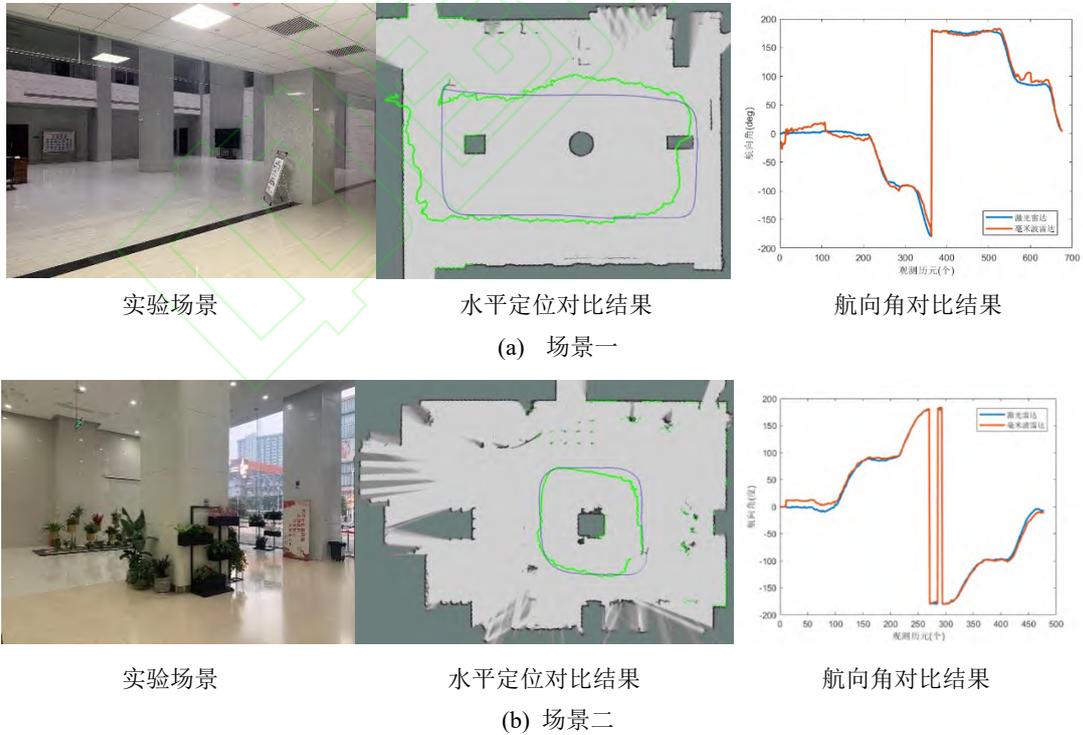
本节设计了3个动态条件下毫米波雷达自定位实验，通过在3个场景中推动毫米波雷达移动，然后实时解算毫米波雷达的自定位结果。为了验证毫米波雷达的自定位精度，本实验在ubuntu系统下进行，采用ROS机器人操作系统采集和处理数据，并使用手持激光雷达设备 iLocator 作为对比真值。手持激光雷达设备如图 15 所示，其搭载传感器包括一个单线激光雷达和一个惯性测量单元传感器，定位算法基于 cartographer^[20] 进行改进，定位精度可达 5 cm。



图 15 手持激光雷达设备(iLocator)

Fig.15 Handheld lidar equipment(iLocator)

毫米波雷达的自定位与手持激光雷达设备的定位对比实验结果如图 16 所示。其中蓝色为手持激光雷达设备的运动轨迹，绿色为毫米波雷达的定位轨迹。场景一和场景三的大小约为 $25\text{m} \times 15\text{m}$ ，场景二大小约为 $20\text{m} \times 15\text{m}$ 。从图中可以看出毫米波雷达误差累积会随时间越来越大，其本质原因是采用相对位姿估计和航位推算会使误差不断累积。场景一和场景三的右侧都有定位结果的横向跳变，通过追踪定位过程发现这两处都只有 2 个较好的特征匹配对，缺少较好的约束导致优化结果出现误差，使得之后的定位误差增大。表 1 列出了毫米波雷达定位的定量结果，其中位置误差采用 TUM 标准数据集评估标准中定义的绝对轨迹误差 (absolute trajectory error, ATE)^[21]，航向角误差为轨迹对齐后的平均航向角误差。



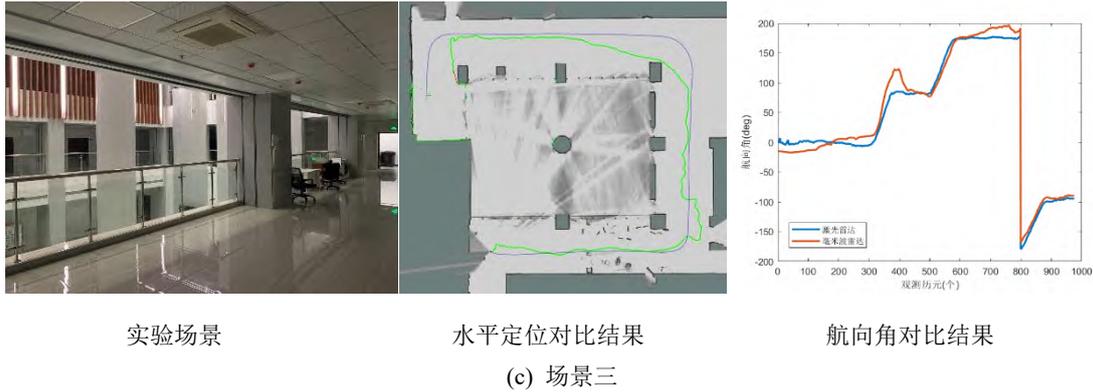


图 16 毫米波雷达的自定位与手持激光雷达设备的定位对比结果

Fig.16 Comparison of ego localization results between mmWave radar and handheld lidar equipment

Tab.1 Absolute trajectory error and average heading angle error of three scenes

表 1 三个场景的绝对轨迹误差和平均航向角误差

场景编号	绝对轨迹误差 ATE(m)	平均航向角误差(deg)
场景一	1.30	6.27
场景二	0.66	4.58
场景三	1.87	10.91

4 结论与讨论

本文针对室内定位需求，提出了一种基于低成本毫米波雷达的室内自定位方法。首先研究了毫米波雷达原始数据处理原理，然后通过 DBSCAN 和最近邻准则提取并匹配质心特征点，最后通过构造非线性优化函数，采用 LM 优化方法求解定位结果。

通过仿真实验与真实场景实验，证明毫米波雷达在一定的配置条件下，可以准确测量物体的位置和速度，且通过提取并匹配毫米波雷达的质心特征点对，采用非线性优化函数可以对毫米波雷达进行实时自定位估计。在静止条件下，其平均水平定位精度可达亚厘米级（均值为 0.83cm，标准差为 0.47cm）。在动态条件下，三个实验场景中的绝对轨迹误差最高可达 0.66m，平均航向角误差可达 4.58°，可以说明利用毫米波雷达进行自定位是可行的且定位结果相对准确。

因为实验条件限制，本文只论证了低成本毫米波雷达在室内自定位的可行性。在后续工作中，将对毫米波雷达自定位进行更深入的研究。例如用毫米波雷达在动态条件下进行长时间，大范围的定位。

目前实验中发现低成本毫米波雷达在定位时存在以下问题：

- 1) 低成本毫米波雷达的角分辨率低，会导致数据畸变，噪声大且不稳定。特别是当场景中有行人等移动目标时，影响会更明显。
- 2) 采用相对运动估计进行递推来求解毫米波雷达的自定位结果会存在累积误差，使得长时间，大范围的定位结果不可靠。

针对这些问题，可行的改进思路包括使用多毫米波雷达进行 360° 测量，或者利用更多的雷达天线阵列提高角分辨率来改善毫米波雷达的观测数据质量。另外，与北斗 GNSS，惯性传感器(IMU)，相机，轮式里程计等多传感器组合也可提高毫米波雷达的定位精度。针对相对定位中存在的累积误差，在室内可通过与蓝牙，WiFi，地磁，视觉特征库等全局定位方式组合或者通过设计全局描述特征，给系统添加回环检测模块等方式来减小累积误差的影响。

总之，低成本毫米波雷达可以作为室内导航定位领域的一种新定位源或辅助定位传感器，并且因为其本身可穿透烟雾雨雪，全天候以及室内外场景通用的优点，可为现在的导航定位系统带来更鲁棒的性能。

5 参考文献

- [1] Chen Ruizhi, Ye Feng. An Overview of Indoor Positioning Technology Based on Wi-Fi Channel State Information[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2064-2070 (陈锐志, 叶锋. 基于 Wi-Fi 信道状态信息的室内定位技术现状综述[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2018, 43(12): 2064-2070)
- [2] Liu Jingbin, Huang Baichuan, Zhang Bin, et al. AOA Estimation Based on Channel State Information Extracted from WiFi with Double Antenna[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2167-2172 (柳景斌, 黄百川, 张斌, 等. 利用双天线商用 WiFi 信道状态信息估计到达角[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2018, 43(12): 2167-2172)
- [3] Chen Ruizhi, Guo Guangyi, Ye Feng, et al. Tightly-Coupled Integration of Acoustic Signal and MEMS Sensors on Smartphones for Indoor Positioning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(2): 143-152 (陈锐志, 郭光毅, 叶锋, 等. 智能手机音频信号与 MEMS 传感器的紧耦合室内定位方法[J]. *测绘学报*, 2021, 50(2): 143-152)
- [4] Wang Rui. *A Pedestrian Dead Reckoning (PDR) Based Indoor Navigation System*[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019 (王锐. 基于行人航位推算(PDR)技术的室内导航系统[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019)
- [5] Campos C, Elvira R, Rodríguez J J G, et al. ORB-SLAM3: An Accurate Open-Source Library for Visual, Visual-Inertial, and Multimap SLAM[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 37(6): 1874-1890
- [6] Mur-Artal R, Montiel J M M, Tardós J D. ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(5): 1147-1163
- [7] Qin T, Li P L, Shen S J. VINS-Mono: A Robust and Versatile Monocular Visual-Inertial State Estimator[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, 34(4): 1004-1020
- [8] Zhang J, Singh S. Visual-lidar odometry and mapping: Low-drift, robust, and fast[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seattle, WA, USA.: 2174-2181
- [9] Wang Z M, Zhang Q, Li J S, et al. A Computationally Efficient Semantic SLAM Solution for Dynamic Scenes[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(11): 1363
- [10] Barnes D, Gadd M, Murcutt P, et al. The Oxford radar RobotCar dataset: A radar extension to the Oxford RobotCar dataset[C]//2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Paris, France.: 6433-6438
- [11] Cen S H, Newman P. Precise ego-motion estimation with millimeter-wave radar under diverse and challenging conditions[C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Brisbane, QLD, Australia.: 6045-6052
- [12] Cen S H, Newman P. Radar-only ego-motion estimation in difficult settings via graph matching[C]//2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Montreal, QC, Canada.: 298-304
- [13] Hong Z Y, Petillot Y, Wang S. RadarSLAM: radar based large-scale SLAM in all weathers[C]//2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Las Vegas, NV, USA.: 5164-5170
- [14] Kung P C, Wang C C, Lin W C. A normal distribution transform-based radar odometry designed for scanning and automotive radars[C]//2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Xi'an, China.: 14417-14423

- [15] Burnett K, Schoellig A P, Barfoot T D. Do we Need to Compensate for Motion Distortion and Doppler Effects in Spinning Radar Navigation? [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 771-778
- [16] Zheng Rui, Li Fangdong. Navigation System of Security Mobile Robot Based on FM Millimeter Wave[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(3): 105-113 (郑睿, 李方东. 基于调频毫米波的安防移动机器人导航系统[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(3): 105-113)
- [17] Wang Yanping, Liu Yutong, Li Yang, et al. PointCloud Matching Localization Method for Millimeter Wave Radar Based on CSM[C]. National Conference on signal and intelligent information processing and Application, 2021(王彦平, 刘宇通, 李洋, 等. 基于CSM的毫米波雷达点云匹配定位方法[C]//第十四届全国信号和智能信息处理与应用学术会议论文集. 北京, 2021: 161-166)
- [18] M Ester, Kriegel H-P, Sander Jrg, et al. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise[J]. *AAAI Press*, 1996
- [19] Moré J J. The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and Theory[M]//Lecture Notes in Mathematics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1978: 105-116
- [20] Hess W, Kohler D, Rapp H, et al. Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Stockholm, Sweden.: 1271-1278
- [21] Sturm J, Engelhard N, Endres F, et al. A benchmark for the evaluation of RGB-D SLAM systems[C]//2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vilamoura-Algarve, Portugal.: 573-580

An Indoor Ego-Localization Method for Low Cost Millimeter Wave Radar

LIU Jingbin¹ WANG Zemin¹ LÜ Xuanfan¹ LI Wei¹ YIN Fei¹ QIU Hongyu¹

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: Millimeter Wave Radar (mmWave Radar) has been widely used in automotive industry and other fields, but its application is mainly limited to the environmental perception of obstacles or specific tasks. At present, there is little research on the application of mmWave Radar in the field of navigation and positioning. Methods: This paper first studies the raw data processing principle of mmWave Radar, and then designs an indoor ego-localization method which only depends on a low-cost mmWave Radar. The process mainly includes extracting centroid feature points using DBSCAN (density based spatial clustering of applications with noise) algorithm, matching centroid feature point pairs through nearest neighbor criterion, constructing nonlinear optimization function and solving positioning results using LM (Levenberg Marquardt) method. Results: Experiments show that indoor navigation and positioning can be solved in real time by using a low-cost mmWave Radar. Under static conditions, the average

horizontal positioning accuracy can reach sub centimeter level (mean value is 0.83cm and standard deviation is 0.47cm). Under dynamic conditions, the absolute trajectory error can reach 0.66m and the average heading angle error can reach 4.58 °, which shows the feasibility of ego-localization of low-cost mmWave Radar. Conclusions: Finally, this paper discusses the problems and feasible research ideas of low-cost mmWave Radar in navigation and positioning.

Keywords: mmWave Radar data processing; mmWave Radar indoor positioning; DBSCAN; nonlinear optimization.

Key Words: indoor positioning; millimeter wave radar data processing; emergency positioning; millimeter wave radar indoor positioning

First author: LIU Jingbin, PhD, professor. Specializes in indoor and outdoor positioning, smartphone navigation, indoor mobile mapping, and GNSS/INS/SLAM integration technology. E-mail: jingbin.liu@whu.edu.cn

Corresponding author: WANG Zemin, PhD candidate. E-mail: zeminwang@whu.edu.cn

Foundation support: the National Natural Science Foundation of China, No. 41874031, No. 42111530064

网络首发:

标题: 一种低成本毫米波雷达的室内自定位方法

作者: 柳景斌, 王泽民, 吕轩凡

DOI: 10.13203/j.whugis20210593

收稿日期: 2022-06-21

引用格式:

柳景斌, 王泽民, 吕轩凡, 等. 一种低成本毫米波雷达的室内自定位方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210593 (LIU Jingbin, WANG Zemin, LÜ Xuanfan, et al. An Indoor Ego-Localization Method for Low Cost Millimeter Wave Radar[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210593)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

一种视觉与惯性协同的室内多行人目标定位方法

张星, 刘涛, 孙龙培, 李清泉, 方志祥

武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(5): 672-680

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200454>