

# BF体制毫米波雷达设计与点云聚类方法研究

闫紫航, 张 华, 阎 博, 孙景荣

(西安电子科技大学空间科学与技术学院, 陕西西安 710126)

**摘要:** 近年来,毫米波雷达体积小、质量轻、处理速度快以及检测精度高,使其在智慧交通领域的应用越来越广泛。毫米波雷达有着不同的波束体制,原理会有所不同。针对波束合成(Beam Forming, BF)体制毫米波雷达,本文首先介绍了波束合成及扫描原理,进而设计了合适的微带阵列天线,采用四芯片级联的方式,研制雷达硬件射频板;在此基础上,给出雷达探测目标获取数据的流程,结合BF体制雷达下的目标数据及点云特征,提出了一种利用区域生长思想的目标点云聚类方法;最后,通过实测实验,验证了该方法的可行性和有效性,通过对比传统的DBSCAN算法,该方法可以有效解决两个目标距离较近时容易聚成一个目标的问题,同时在点云数较大的情况下可以有效减少处理耗时。该方法为BF体制雷达平台的目标检测、跟踪和识别等应用提供了有力支撑,具有广阔的应用前景和实用价值。

**关键词:** 毫米波雷达; 四芯片级联; BF体制; 区域生长; 点云聚类

中图分类号: TN958 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2025)05-0513-10

引用格式: 闫紫航, 张华, 阎博, 等. BF体制毫米波雷达设计与点云聚类方法研究[J]. 雷达科学与技术, 2025, 23(5): 513-522.

YAN Zihang, ZHANG Hua, YAN Bo, et al. BF System Millimeter-Wave Radar Design and Point Cloud Clustering Method Research[J]. Radar Science and Technology, 2025, 23(5): 513-522.

## BF System Millimeter-Wave Radar Design and Point Cloud Clustering Method Research

YAN Zihang, ZHANG Hua, YAN Bo, SUN Jingrong

(School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710126, China)

**Abstract:** In recent years, millimeter-wave radars have become more and more widely used in the field of smart transportation due to their small size, light weight, fast processing speed and high detection accuracy. Millimeter-wave radars have different beam systems and their principles are different. For beamforming (BF) system millimeter-wave radars, this paper first introduces the principle of beamforming and scanning, and then designs a suitable microstrip array antenna. The radar hardware RF board is developed by cascading four chips. On this basis, the process of obtaining data for radar target detection is given. Combined with the target data and point cloud features under the BF radar, a target point cloud clustering method using the regional growth idea is proposed. Finally, the feasibility and effectiveness of this method are verified through field experiments. By comparing with the traditional DBSCAN algorithm, this method can effectively solve the problem that two targets are easily clustered into one target when the distance between two targets is close. At the same time, it can effectively reduce the processing time when the number of point clouds is large. This method provides strong support for the application of target detection, tracking and recognition of the BF radar platform, and has broad application prospects and practical value.

**Key words:** millimeter-wave radar; four-chip cascade; BF system; regional growth; point cloud clustering

## 0 引言

随着智慧交通系统的迅猛发展,毫米波雷达技术作为其核心组成部分,不仅在车载领域发展迅速,也正逐步在交通监测与管理领域展现出其

不可替代的优势<sup>[1-2]</sup>。尤其是在复杂多变的天气条件下,如大雨、大雾等,传统基于摄像头的监测手段往往面临严峻挑战,其检测效果并不理想,对车辆目标的准确识别与跟踪会存在较大的偏差<sup>[3]</sup>。相比之下,毫米波雷达凭借其高分辨率、强抗干扰

性及全天候工作能力,成为提升交通监测精度与可靠性的关键技术之一,其应用前景愈发广阔<sup>[4]</sup>。为此越来越多的研究人员开始研究毫米波雷达的车辆目标探测问题。

目前,对于毫米波雷达的研究主要集中在两种体制上:单波束雷达和波束合成体制雷达。单波束雷达虽然结构简单,但其角分辨率较低,无法对多目标进行精确探测和跟踪<sup>[5]</sup>。与此相比,BF体制毫米波雷达利用天线阵列的相控原理,能够通过控制每个天线单元的相位,形成特定方向的波束,并实现水平扫描。这种方式可以显著提高雷达的角分辨率,支持对多个目标的同时探测和跟踪,满足智能交通系统对车辆目标精确探测的要求<sup>[6]</sup>。

现有的BF体制毫米波雷达虽然在探测精度上有了显著提升,但其数据处理仍面临一些挑战。由于波束扫描的特性,同一目标可能会在多个不同角度下产生多个探测点云,这些点云在后续处理时需要进行聚类,将同一目标的多个点合并为一个点目标。然而,现有的目标点云聚类算法存在着一定的局限性。以K-means算法为代表的划分法通过确定分类数目K后,将距离作为分类指标,按照簇内的点分布紧密且簇间的距离相对大的规则进行聚类,直至聚类结果不再更新,此方法对K值较敏感,以及随机确定的初始中心,会影响算法的收敛速度和聚类结果<sup>[7]</sup>。文献[8]中的DBSCAN是基于空间数据点分布密度的算法,其对噪声不敏感,能发现任意形状的簇,但当同类数据相距较近时聚类效果会略差,影响聚类结果。此外,随着雷达数据点的增加,DBSCAN算法的计算复杂度也随之上升,影响了实时性,出现“掉帧”现象。

针对上述问题,本文在深入研究BF体制毫米波雷达技术原理的基础上,进行了以下几方面的创新设计与优化:

1) 天线阵列与射频板设计。本文设计了基于微带阵列天线的雷达硬件射频板,采用四芯片级联技术,提升了天线的集成度与性能稳定性,为后续波束合成与扫描奠定了坚实基础。

2) 目标点云聚类算法创新。针对BF体制雷

达生成的稀疏点云特征,本文提出了一种基于区域生长策略的高效聚类方法。首先进行聚类核心点的确定与选取,再利用区域生长策略进行聚类,有效避免了传统算法在复杂场景下的局限性,能够更准确地识别并聚类车辆目标,即便在车辆间距较近的情况下也能实现有效区分。

3) 实验验证与性能分析。通过实测实验,本文验证了所提聚类方法在实际道路车辆监测中的有效性,并对比了传统DBSCAN算法在数据处理耗时方面的差异。实验结果表明,本文设计的BF体制毫米波雷达及其聚类方法在提升目标识别精度与降低系统延迟方面均有效,为智慧交通系统的进一步发展提供了有力支持。

## 1 BF体制原理及实现

### 1.1 波束扫描原理

波束扫描的概念应用在相控阵雷达中,相控阵雷达通过调整各天线单元的发射相位实现合成后的波束指向不同的方向,采用电子方式的波束扫描代替了传统的机械旋转扫描方式,可实现波束的快速、灵活扫描,大大提高了雷达的扫描速度和精度。

相控阵雷达的波束扫描原理是基于电磁波的干涉与叠加原理。阵列中的每个辐射单元都可以看作是一个点源,它们发出的电磁波在空间中传播并相遇时,会发生干涉现象。通过精确控制每个辐射单元的相位,可以使得在特定方向上的电磁波相干叠加,从而形成一个强波束;而在其他方向上,由于相位差异,电磁波则会相互抵消,形成弱波束或零波束。这样,通过调整各辐射单元的相位,就可以实现波束在空间中的快速扫描。

具体来说,相控阵雷达的波束扫描是通过电子移相器实现的。电子移相器能够精确地控制每个辐射单元的相位,使其按照预定的规律变化。当需要改变波束指向时,只需调整各辐射单元的相位分布,即可使波束指向新的方向。这种电子扫描方式不仅速度快,而且精度高,可以实现对目标的快速跟踪和精确定位。利用该原理设计32通道天线阵列,波束合成指向示意图如图1所示。

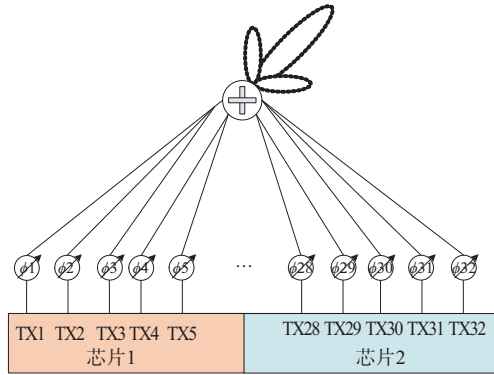


图1 合成波束指向示意图

相较传统雷达,BF体制雷达波束指向更加灵活,能实现无惯性快速扫描,数据率高;对复杂目标环境的适应能力强,同时抗干扰性能好。

## 1.2 BF体制射频天线设计与实现

毫米波雷达天线阵列设计采用微带阵列天线方案,微带阵列天线主要优势在于天线体积小、结构简单、易与MMIC集成<sup>[9]</sup>。因此雷达采用微带阵列天线方案。根据工程经验可知单个矩阵贴片天线的增益为7~8 dBi。因此需要对发射天线进行阵列设计以达到要求。

由于阵列天线的辐射方向图由 $G_E$ 与阵列因子 $G_A$ 组成的。元件因子 $G_E$ 表示单个天线元件的辐射方向图,一般来说阵列天线中的所有天线元件具有相同的元件因子。阵列因子主要取决于阵列的结构(阵列排列间隔)以及波束权重(幅度与相位)<sup>[10]</sup>。所以当单个发射天线元件设计完成以后,雷达整体的发射功率与性能指标主要取决于阵列因子,均匀线阵的标准化阵列因子如式(1)所示。

$$|F(\theta)| = \left| \frac{\sin \left[ \frac{\pi N d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]}{N \sin \left[ \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]} \right| \quad (1)$$

式中, $d$ 表示天线阵元间隔, $\theta$ 表示目标方向角, $\theta_0$ 表示合成波束指向角。

合成波束指向角 $\theta_0$ 与相邻阵元馈电相位差 $\phi$ 关系如下:

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_0 \quad (2)$$

目标方向角 $\theta$ 与目标回波到达相邻阵元的相位差(空间相应差) $\varphi$ 关系如下:

$$\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \quad (3)$$

根据式(1)可得,当 $\theta = \theta_0$ 时,有 $|F(\theta)|_{\max} = |F(\theta_0)| = 1$ ,此时由式(2)可得,波束指向角 $\theta_0$ 如式(4)所示。

$$\theta = \theta_0 = \sin^{-1} \frac{\lambda \cdot \phi}{d \cdot 2\pi} \quad (4)$$

合成波束指向角由相邻发射天线的馈电相位差 $\phi$ 决定,所以在实际应用中,可以通过改变每个TX通道的相位值,改变发射天线阵列之间相位差,进而改变波束指向角,从而实现波束合成。本文中用到的毫米波雷达射频芯片的每个TX通道均包含一个独立的移相器,移相精度为 $5.625^\circ$ ,可以通过对移相器进行编程来控制发射天线波束合成指向。雷达射频前端有32个TX通道,以TX1为基准,假设需要的合成波束指向角为 $\theta$ ,则32个发射通道的移相器矢量表示如下:

$$\begin{aligned} \bar{s} &= [s_1, s_2, s_3, \dots, s_N] = \\ &[0 \quad 2\pi \frac{d_2}{\lambda} \sin \theta \quad 2\pi \frac{d_3}{\lambda} \sin \theta \quad \dots \quad 2\pi \frac{d_{32}}{\lambda} \sin \theta] \end{aligned} \quad (5)$$

雷达系统发射端采用32根微带阵列天线组成发射天线阵列,阵列间隔为90 mil,阵列均匀排布,天线排布方式如图2所示。

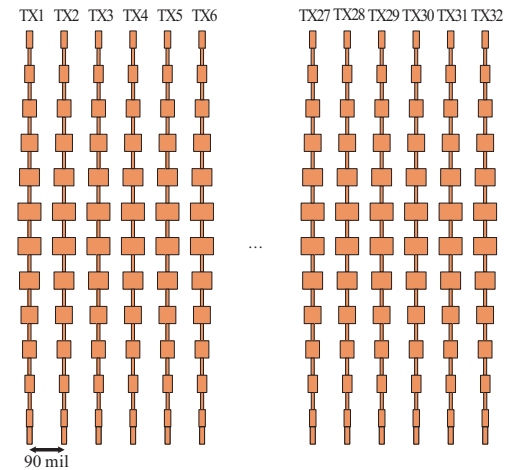


图2 微带阵列天线排布方式

雷达射频硬件采用四芯片级联的方案,其中两个芯片用来发射电磁波信号,另外两个芯片用来接收电磁波信号。发射和接收的天线阵列排布方式均如图2所示,通过此排布方式,可以更好地

实现波束合成指向,雷达硬件射频板如图 3 所示。

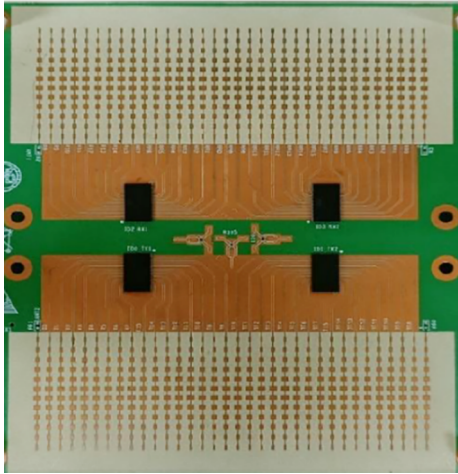


图 3 毫米波雷达射频板硬件图

## 2 BF体制雷达数据获取

本文提到的毫米波雷达采用的是相控阵波束合成体制,发射调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)对目标进行探测,这与周期性发射短脉冲的传统脉冲雷达系统不同。FM-CW 雷达系统所用信号的频率随时间变化呈线性升高。

在获取目标数据时,雷达首先通过射频天线发射信号,然后接收来自目标的反射信号。当车辆目标出现在雷达探测范围内,雷达的接收天线会收到目标的反射信号,进一步对回波信号做处理,以获得目标位置、速度及角度等信息。

射频接收天线收到目标回波信号以后,将回波信号与当前发射信号进行混频,来自混频器的中频信号由 ADC 单元转换成数字信号进行信号处理。在数字信号处理系统中,通过基于距离维和速度维的快速傅里叶变换对 Chirp 信号组进行处理得到包含目标位置和速度信息的二维距离-多普勒矩阵(2D-RDM)。最后通过恒虚警率(Constant

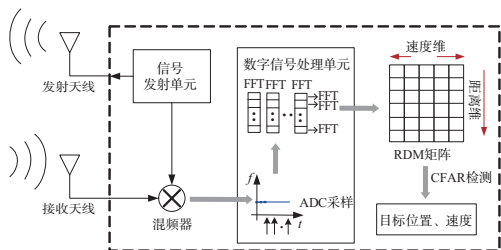


图 4 目标距离、速度获取流程图

False-Alarm Rate, CFAR)检测算法可以得到目标的位置和速度<sup>[11]</sup>。数据获取流程如图 4 所示。

通过以上流程,在 CFAR 检测之后,就可以得到目标的检测结果,对目标的检测结果以点云的形式呈现。

## 3 目标点云聚类方法实现

当雷达对目标进行探测形成点云后,为了后续对目标进行跟踪,每个目标应该被聚成一个目标点,因此需要考虑聚类问题。毫米波雷达获取的是目标的径向信息,点云数据分布沿切向发散,存在角分辨率低、输出稀疏、分布不均匀等缺点,同时还存在噪声杂波和虚假目标影响<sup>[12]</sup>。为了更好地进行目标稳定跟踪,需要一个较好的点云聚类方法,有必要设计一种方法来提高毫米波雷达点云聚类性能。

在聚类过程中,首先进行的应该是选取聚类核心点,核心点的数量决定了点云在聚类的过程中会聚为几类,因此确定聚类核心点对聚类的结果有很大的影响。在此之后,点云基于核心点进行聚类操作。

### 3.1 聚类核心点的确定与选取

对于聚类核心点,应该同时具备两个特点:一是本身的密度大,即它被密度不超过它的邻居包围;二是与其他密度更大的数据点之间的欧式距离相对更大<sup>[13]</sup>。

本文将使用毫米波雷达采集点云数据,所有的样本点集合记为  $A = \{a_i\}_{i=1}^n$ ,对集合中的点进行聚类。计算两点之间的欧式距离记为  $d_{ij}$ ,我们将欧式距离按照升序进行排序,定义截断距离  $d_c$  为第  $r$  个  $d_{ij}$ ,其中  $r$  由式(6)计算可得。式中  $p$  是一个可设置的百分比参数,根据应用场景的不同可以进行修改。设置的参数  $p$  值越大,过滤出的簇数越多。

$$r = \text{round}\left(\frac{n(n-1)}{2} * p\right) \quad (6)$$

每个数据点密度记为  $\rho_i$ ,可通过式(7)计算得到:

$$\rho_i = \sum_{j \in N \setminus \{i\}} e^{-\left(\frac{d_{ij}}{d_c}\right)^2} \quad (7)$$

对于每一个数据点,寻找到比其本身密度更大的数据点,如果有更大密度的数据点,则距离特征值应选择较小的;如果找不到密度更大的数据点,让距离特征值取最大。最终可以通过每一个点的密度特征和距离特征来确定是否可以成为聚类核心点,距离特征值的取值如式(8)所示。

$$\sigma_i = \begin{cases} \min_{j \in N^i} \{d_{ij}\}, N^i \neq \emptyset \\ \max_{j \in N} \{d_{ij}\}, N^i = \emptyset \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $N^i = \{k \in N: \rho_k > \rho_i\}$ 。

通过对数据样本点集中每一个点都进行计算,得到密度特征和距离特征二维坐标,即 $(\rho_i, \sigma_i)$ ,将每一个点的 $(\rho_i, \sigma_i)$ 在平面坐标中画出(以密度特征 $\rho_i$ 为横坐标,距离特征 $\sigma_i$ 为纵坐标),可以得到二维平面的散点图,散点图右上方的点满足聚类核心点要求的特点,即 $\rho_i$ 和 $\sigma_i$ 均较大,这样可以通过二维平面散点图确定聚类核心点。密度特征和距离特征二维散点图如图5所示。

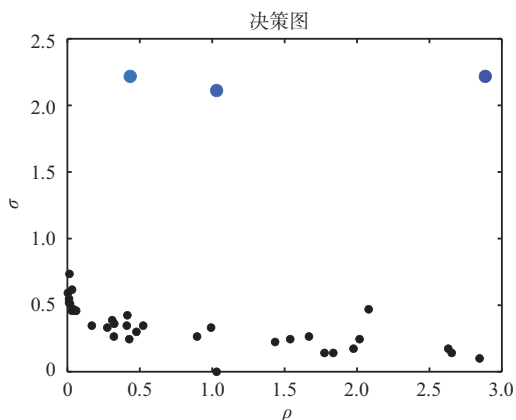


图5 二维特征散点图

从图5可以看出,蓝色点满足密度特征和距离特征都较大,符合核心点的特点,通过决策图可以确定出3个核心点,在确定了潜在的核心点后,以核心点为中心进一步进行后续的聚类处理。

由于核心点的选择对后续聚类的效果影响很大,因此需要确保核心点选择的准确性。为了保证其准确性,引入核心点预采样策略。对于不同类型的目标,因其大小不同,故雷达进行探测所形成的点云形状不同,分布于不同的单元格。通过已知的雷达波形参数,可进一步算出探测范围内最小目标占据的单元格数,由此构成的目标点云

形状长度记为 $L$ ,宽度为 $W$ 。以长小于 $L/2$ 、宽小于 $W/2$ 为间隔对目标点云进行采样,如此便能确保,至少有一个包含真实目标的数据点被作为种子点。采样完得到的预选核心点,进一步通过上文中距离特征和密度特征完成核心点的筛选,优先对密度特征和距离特征都较大的核心点进行区域生长,以此保证核心点选取的准确性。流程如图6所示。

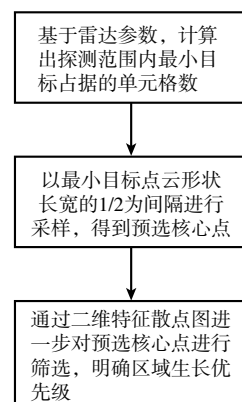


图6 核心点选取流程图

### 3.2 基于区域生长的点云聚类方法

在确定好聚类中心点后,点云中其余点如何准确合适地聚类在一起,是需要进一步研究的。为了解决传统聚类算法无法解决的问题,提出一种基于区域生长的点云聚类方法,该方法可以在无需初始参数的情况下对数据点进行聚类,并获得更加准确的聚类效果。

区域生长是一种普遍用于图像分割的方法<sup>[14]</sup>,基于像素相似性,从给定的“种子点”开始,通过逐步添加与该点相似的像素来扩展区域,直到满足一定条件为止<sup>[15]</sup>。利用该思想,通过改进,采用区域生长的方法,同样也可以对雷达的目标点云进行聚类,聚类本质上是雷达的目标点云集合起来构成不同的区域。在雷达数据处理单元,会得到目标的二维位置信息,形成目标点云图。通过3.1节中的方式选取聚类核心点,作为生长的起点,然后将核心点周围相近的目标点合并到核心点所在的区域中。而新的点继续作为种子向四周生长,直到再没有满足条件的目标点可以包括进来,则该区域生长结束。

在雷达获得目标的点云之后,采用区域生长方法进行聚类。首先,建立一个网格地图,将处理后的雷达点云数据分布在这个网格地图中,根据 3.1 节选出聚类的核心点,将该点作为“种子点”,设置搜索区域跨度,搜索区域的大小将会影响聚类的效果,因此这个参数需要根据不同的情况设置不同的值。以“种子点”为中心,在设定好的搜索区域进行搜索,若该区域内存在雷达的目标点,说明该点与核心点距离较近,应该聚为一类,则将这些点归进这一类;再以这些新加入的点为中心,在其周围的搜索区域进行搜索,看是否有满足条件的点。遍历所有的点,直到没有新的点添加进来,当前核心点的区域生长聚类结束。当所有核心点都完成区域生长操作,雷达的该帧数据就完成了聚类步骤。将所有步骤画成流程框图如图 7 所示。

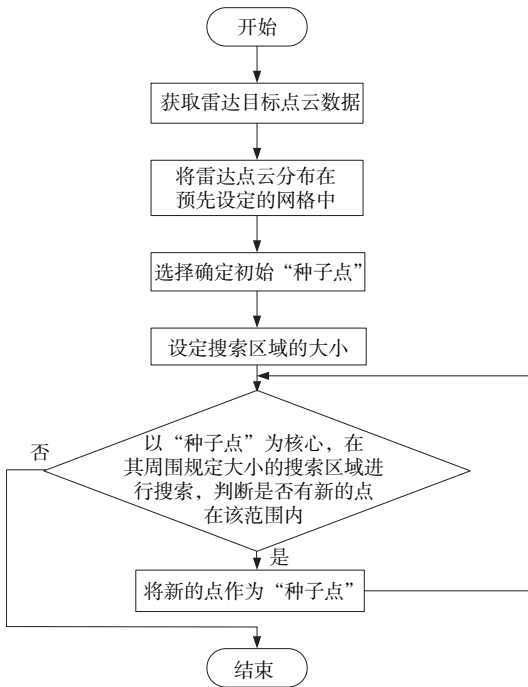
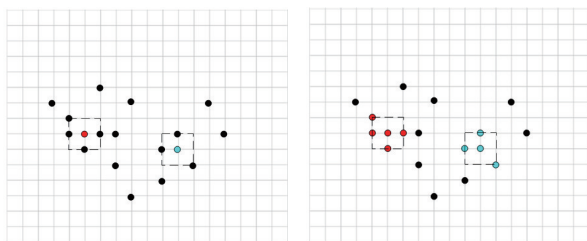


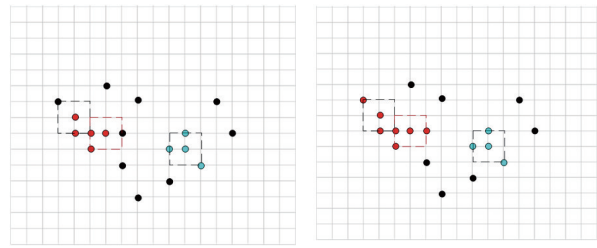
图 7 区域生长流程框图

区域生长的过程示意图如图 8 所示。



(a) 区域生长第一步

(b) 区域生长第二步



(c) 区域生长第三步

(d) 区域生长第四步

图 8 点云区域生长过程示意图

上述所有目标点云通过区域生长方法以后,聚成了两类,红色点为一类,绿色点为一类。其他没有被聚类的点为噪声点,在点云聚类过程中,噪声点会影响聚类效果,因此好的聚类方法所聚类的结果应不受噪声点的影响。

本文所用到的 BF 体制毫米波雷达在工作时,波束将会以一定的角度步进从左到右进行扫描,扫描示意图如图 9 所示,由于波束宽度较窄,在这样的扫描方式下,一个车辆目标将会被邻近的多个不同波束扫描到,因而一个目标将会形成多个目标点,因此波束从左到右扫描一遍,将会形成目标点云。固定的角分辨率会导致在笛卡尔坐标系中点云密度的变化,点云密度会因距离而不同,近距离目标的点云密度比较大,点与点之间的距离较近;远距离目标的点云密度较小,点数稀疏,数据量小<sup>[16]</sup>。点云特征如图 10 所示。

点云在采用区域生长进行聚类的过程中,由于目标距离雷达的位置不同,其呈现的点云形状会有所不同,因此聚类的范围大小也会不同。为了更好地说明点云在不同距离下的呈现差别,通过实测采集了大量的目标点云数据,图 11 为不同距离下的目标点云特征图。

图 11 中的结果是大量数据统计后的结果,具有一定的代表性,可以更好地表征点云的分布特

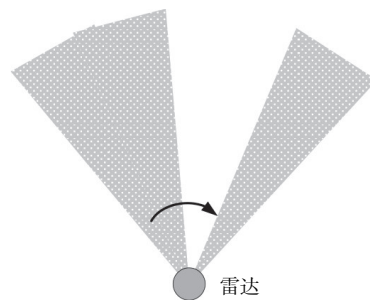


图 9 雷达波束扫描示意图

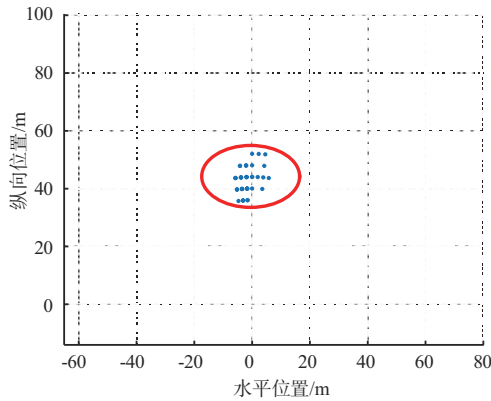


图10 雷达形成的单目标的点云图

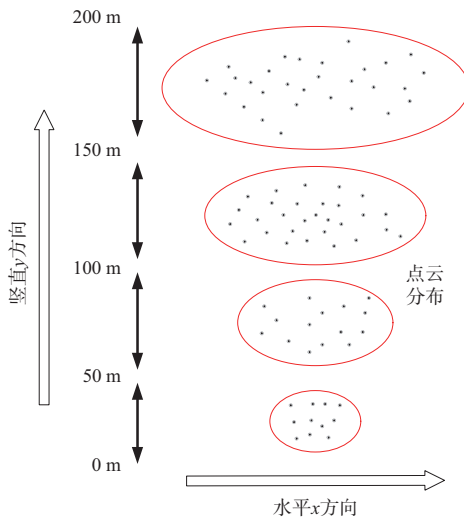


图11 不同距离下的目标点云特征图

点。通过图11可以看出,点云分布整体呈椭圆状,在近距离处,目标的点云比较密集,在较远距离处,目标点云分布较稀疏,水平方位上分布较散。

针对上述的点云分布特征,合适的区域生长策略可以提升最终的聚类效果。在区域生长聚类过程中,初始种子点坐标记为 $(x_0, y_0)$ ,搜索区域大小参数设为 $(\Delta x, \Delta y)$ ,设置好该参数后,便在水平方向上 $(x_0 - \Delta x, x_0 + \Delta x)$ 范围、竖直方向上 $(y_0 - \Delta y, y_0 + \Delta y)$ 范围内进行搜索。在迭代搜索过程中,水平方向上的区域生长步进 $\Delta x$ 依据点的纵向位置大小进行调整更新,关系式如下:

$$\Delta x = My \quad (9)$$

式中, $M$ 为常数。当目标点云纵向位置 $y$ 越大,在区域生长时水平生长步进就越大,有效应对远距离处点云稀疏分散的问题。

区域生长的过程中,并不是无限制地进行生长,应根据实际情况加以限制,从而达到一个更好的聚类效果。本研究主要应用在交通道路上进行车辆探测,对于行驶的车辆目标,其水平方向和竖直方向都有一定的大小,通过大量测试可以得到大车和小车的点云分布情况,区域生长过程中已生长的尺寸大小记为 $(A_x, A_y)$ , $A_x$ 代表水平方向尺寸大小, $A_y$ 代表竖直方向尺寸大小,设定阈值 $(\theta_{mx}, \theta_{my})$ 。 $\theta_{mx}$ 代表水平方向阈值限制, $\theta_{my}$ 代表竖直方向阈值限制。区域生长在限制条件式(10)下进行:

$$\begin{cases} A_x \leq \theta_{mx} \\ A_y \leq \theta_{my} \end{cases} \quad (10)$$

针对应用场景中的不同类型的目标,阈值设定也将不同。统计大量实测数据,得到不同距离下不同目标以及杂波的点云数量分布,对结果进行了归一化处理,得到不同类型目标的点云分布趋势如图12所示。从图中可以看出,在同一距离下,目标类型越大,其点云分布越多;对于同一类型目标,随着目标距离越远,点云分布数量逐渐减少。

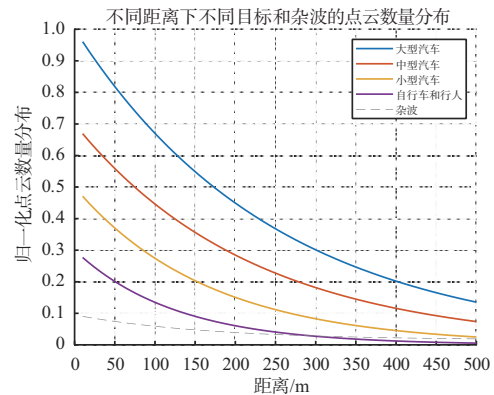


图12 不同类型目标的点云统计分布

通过上述分析,阈值可根据此分布进行设定,满足不同类型目标的聚类特点,进一步保证聚类效果。

## 4 实测效果

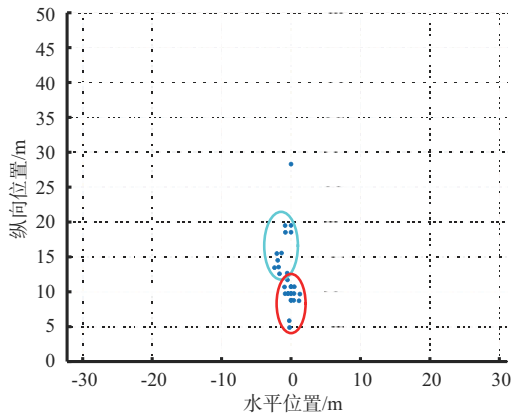
为了验证该方法的有效性,进行了室外道路实际测量,并获取相应的雷达点云数据。实验所用毫米波雷达的射频硬件如图3所示,该雷达支持水平方向左右各 $15^\circ$ 的视角。对于该雷达的参数配置如表1所示。

表 1 雷达参数配置

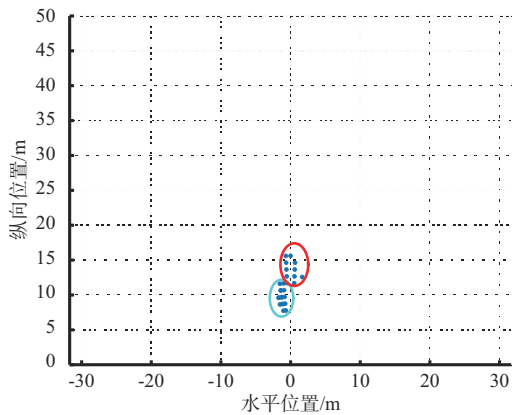
参数	参数值
起始频率 $f_c$	78 GHz
Chirp上升沿时长 $T_0$	25 $\mu$ s
Chirp下降沿时长 $T_1$	2.7 $\mu$ s
波束扫描范围	$-12.5^\circ \sim 12.5^\circ$
扫描步进角度	$2.5^\circ$
距离分辨率	0.976 m
速度分辨率	0.536 m/s

首先测试目标数量较少情况下的聚类效果,选取一段合适的路段,测量时雷达安置在距离地面高度 1.8~2 m 处,调整好雷达的角度,使雷达能够更好地探测到道路上的车辆目标,以便形成比较丰富的点云。实验所针对的目标主要是小型 5 座客车,在车辆运动的过程中,采集多帧数据,进行后续聚类分析。

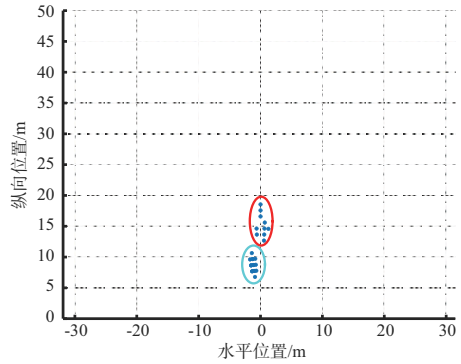
在实验过程中,选取合适的道路行驶的车辆,采集雷达的多帧数据。如图 13 所示,从采集到的点云可以看出,两辆车相向行驶,不断靠近,并驶离。



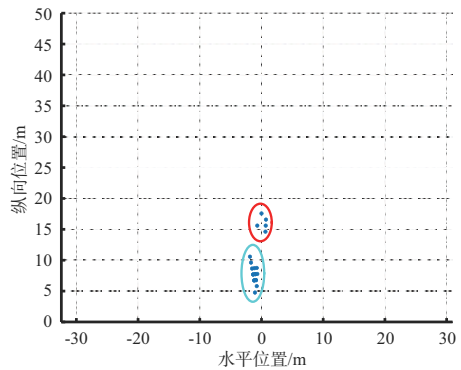
(a) 第 18 帧数据



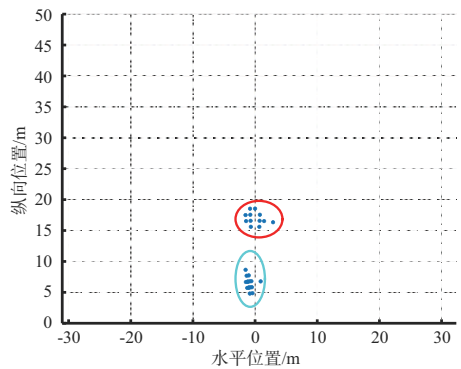
(b) 第 19 帧数据



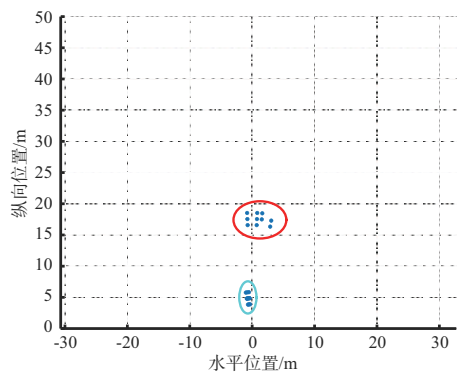
(c) 第 20 帧数据



(d) 第 21 帧数据



(e) 第 22 帧数据



(f) 第 23 帧数据

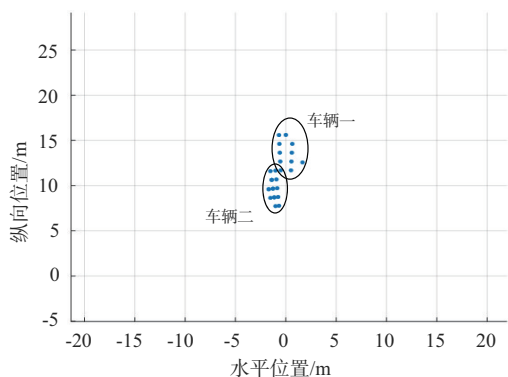
图 13 实验采集的多帧点云数据

只针对其中某一帧的数据进行聚类处理,选取两辆车行驶距离靠得较近时刻,对点云数据进行聚类操作,测试车辆实验场景如图14所示。

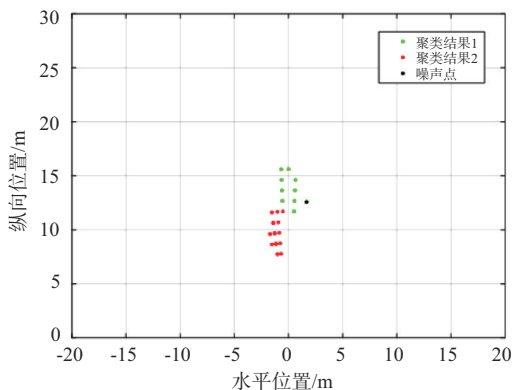


图14 实验场景图

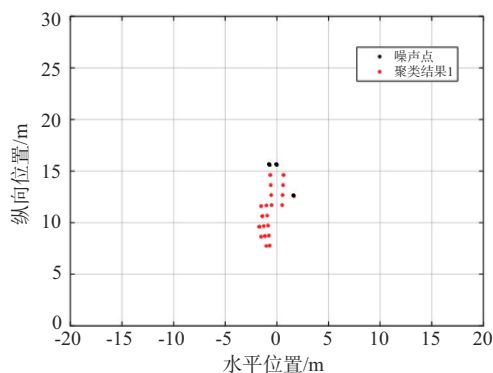
与该场景对应的点云数据及聚类结果如图15所示。



(a) 聚类前的原始点云数据



(b) 基于区域生长方法聚类后的结果



(c) 传统DBSCAN方法聚类后的结果

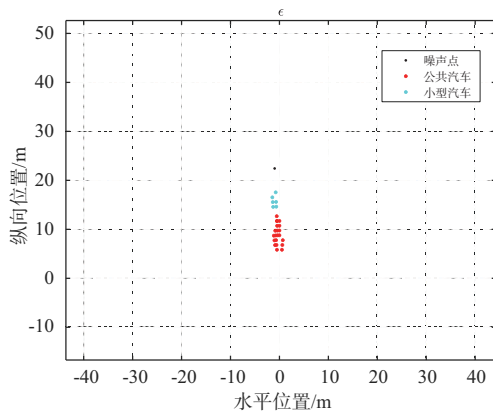
图15 实验测试点云数据及其聚类结果

从上述聚类结果可以看出,两目标在较近的情况下,采用文中的基于区域生长的聚类方法可以有效地对目标车辆进行聚类,并且聚类结果符合实际情况;然后传统的DBSCAN方法将两个较近的目标聚成了一类,显然与实际不符。通过实测验证,该方法不仅可以有效解决两个靠得太近目标不易进行区分的问题,同时在聚类过程中也大大降低了计算量,提高了处理效率。

针对不同类型的目标,均进行了测试,采集目标数据并进行分析,图16和图17展示了测试场景及点云数据聚类结果图。图16(a)中对行驶中的公共汽车和小型汽车进行了探测,当两辆车相距较近时,聚类结果依然符合实际情况,如图16(b)所示。图17(a)中进一步验证小型汽车和自行车两类不同目标的聚类效果,测试过程中,自行车和小型汽车同向行驶,采集两目标相距较近时的探测数据,聚类结果如图17(b)所示。由此可见,该聚类方法对于不同类型的目标均适用。



(a) 测试场景

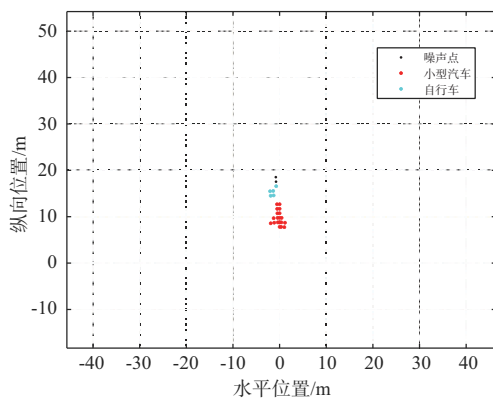


(b) 点云聚类后的结果

图 16 公共汽车和小型汽车测试场景及结果



(a) 测试场景



(b) 点云聚类后的结果

图 17 小型汽车和自行车测试场景及结果

考虑到算法处理速度的问题,实验过程中也采集了大量目标数据,比较基于区域生长的聚类方法和传统的 DBSCAN 聚类算法在处理过程中的耗时,对比结果如表 2 所示。

表 2 不同点云数算法处理耗时比较

点云数量	本文所提算法/ms	传统 DBSCAN 算法/ms
161	3.552	3.598
287	6.635	6.754
378	8.537	8.937
497	12.049	13.145
560	12.877	13.972
819	20.951	22.753
1 127	27.209	30.218

上述对比通过大量的点云数据来对算法处理耗时进行分析,由于硬件平台对数据处理会因运行时间长短有所变化,所以试验分析时采用了大量数据,上述数据为统计后的平均结果,具有一定的代表性。从数据结果可以看出,当点云数较少时,本文提出的算法虽然比传统的 DBSCAN 算法有改善,但是耗时改善的并不明显,但是当点云数较多,达到上千点云数时,可以看出耗时改善的较为明显,该方法可以有效地应用在车流量较大的场景中,进一步加快数据处理速度。

## 5 结束语

本文针对 BF 体制毫米波雷达,从其波束合成原理出发,设计相应的微带天线,并研制雷达硬件射频板。在此基础上研究了 BF 体制毫米波雷达稀疏点云聚类方法,通过对现有聚类的分析和优化,利用区域生长的思想,提出一种适用于 BF 体制雷达的高效聚类方法,该方法不仅可以有效解决两个靠得太近目标不易进行区分的问题,同时在聚类过程中也大大降低了计算量,提高了处理效率。通过实际测试,验证了该方法可以有效提高聚类的准确性和实时性。该方法不仅为 BF 体制雷达的目标检测与识别提供了有力支持,也为其他类型雷达的数据处理提供了有益的参考。

## 参考文献:

- [1] 李家强,任梦豪,危雨萱,等.基于轻量化网络的车载雷达目标分类方法[J].雷达科学与技术,2023,21(6):597-604.
- [2] 赵聪,师钰鹏,丁德隆,等.智慧公路毫米波雷达感知精度分析与验证[J].中国公路学报,2024,37(1):205-214.
- [3] 王西.新基建背景下智慧高速多元融合感知技术应用浅谈[J].中国交通信息化,2020(6):(下转第 528 页)

- [9] 张泽君,程伟,杨瑞娟,等.航空信道下基于双谱和信息维数的通信电台个体识别[J].空军预警学院学报,2016,30(1):21-25.
- [10] 张泽君,程伟,杨瑞娟,等.航空信道下一种通信电台个体识别方法[J].空军预警学院学报,2016,30(2):106-110.
- [11] 幸晨杰,王良刚.应用深度神经网络和集成学习的电台个体识别[J].电讯技术,2021,61(9):1059-1065.
- [12] 方棉佳,陈朝.针对敌我识别系统的个体识别研究[J].雷达科学与技术,2023,21(3):298-302.
- [13] 文博龙.新型敌我识别器中应答机数字处理系统设计[D].成都:电子科技大学,2013.
- [14] JIANG Yifan, YANG Zhutian, BO Chao, et al. Continuous IFF Response Signal Recognition Technology Based on Capsule Network [C]//3rd EAI International Conference, Xining, China: Springer, 2021:455-468.
- [15] DUAN Huanhuan, CHENG Yufan, SHEN Bingbing, et al. LFM Interference Cancellation Algorithm Based on MDPT-WC for Mark XIIA Mode 5 [C]//IEEE 20th International Conference on Communication Technology, Nanjing, China: IEEE, 2020:246-252.
- [16] HE Jiashuo, HUANG Sai, CHANG Shuo, et al. Radio Frequency Fingerprint Identification with Hybrid Time-Varying Distortions [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2023, 22(10):6724-6736.
- [17] RAJENDRAN S, SUN Zhi. RF Impairment Model-Based IoT Physical-Layer Identification for Enhanced Domain Generalization [J]. IEEE Trans on Information Forensics and Security, 2022, 17:1285-1299.

#### 作者简介:

**夏韶俊** 男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电子侦察系统设计。

**胡泽宾** 男,博士,正高级工程师,主要研究方向为电子对抗系统设计。

**牛勤** 女,博士,高级工程师,主要研究方向为电子侦察系统设计。

**孔祥明月** 男,硕士,工程师,主要研究方向为电子侦察系统设计。

**杨钟灵** 女,学士,助理工程师,主要研究方向为雷达电子。

(上接第522页)

125-126.

- [4] 龙学军,谭志国,高枫.多传感器融合路侧感知技术应用现状分析[J].中国交通信息化,2021(10):137-140.
- [5] 李晓辉,李欢洋,吕思婷,等.毫米波通感一体化中的混合波束赋形算法[J].系统工程与电子技术,2023,45(5):1512-1517.
- [6] RAD M K, ANDARGOLI S M H. Power Control and Beamforming in Passive Phased Array Radars for Low Probability of Interception [J]. Digital Signal Processing, 2021, 117:103165.
- [7] 杨柳.K-means 聚类算法性能分析与优化研究[J].火控雷达技术,2019,48(2):16-19.
- [8] DADGARNIA A, SADEGHI M T. A Novel Method of Deinterleaving Radar Pulse Sequences Based on a Modified DBSCAN Algorithm [J]. China Communications, 2023, 20(2):198-215.
- [9] 毛永艳.平面阵列天线设计与优化[D].西安:西安电子科技大学,2021.
- [10] 韩旭,于大群.相控阵天线指向测量误差分析及消除方法研究[J].微波学报,2023,39(2):52-57.
- [11] 丁左武,徐杰,周龙,等.车载毫米波雷达目标检测综述[J].电讯技术,2024,64(4):655-662.
- [12] 鞠夕强,孟文,孟祥印,等.一种改进的毫米波雷达聚类算法[J].科学技术与工程,2021,21(20):8537-8543.
- [13] CAO Lin, LIU Yunxiao, WANG Dongfeng, et al. A Novel Density Peak Fuzzy Clustering Algorithm for Moving Vehicles Using Traffic Radar [J]. Electronics, 2019, 9(1):9010046.
- [14] 高晶,蔡幸福,刘志强,等.基于区域生长的目标检测方法[J].北京工业大学学报,2016,42(6):856-861.
- [15] 王义敏,秦永元.基于区域生长的SAR图像目标检测方法研究[J].计算机应用,2009,29(1):45-46.
- [16] 钟晋孝,晋良念.毫米波雷达目标点云稳健自适应聚类方法[J].科学技术与工程,2022,22(5):1936-1943.

#### 作者简介:

**闫紫航** 男,博士研究生,主要研究方向为分布式雷达成像。

**张华** 男,博士,教授,主要研究方向为雷达技术、信号处理。

**阎博** 男,博士,副教授,主要研究方向为雷达目标跟踪算法。

**孙景荣** 女,博士,教授,主要研究方向为雷达成像、目标识别。