陈佳乐, 姜黎, 于洋,等. 基于最近邻质心分类的雷达速度解模糊算法研究[J]. 智能计算机与应用,2026,16(7):131-138.
DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.24112502

基于最近邻质心分类的雷达速度解模糊算法研究

陈佳乐[1], 姜 黎[1], 于 洋[2], 李振涛[2]
(1 湘潭大学 物理与光电工程学院, 湖南 湘潭 411105; 2 湖南毅梁微电子有限公司, 长沙 410003)

摘 要: 针对时分复用毫米波雷达系统中的速度模糊问题,本文提出了一种改进的基于最近邻质心分类的速度解模糊算法。该算法首先通过分析目标信号的相位变化情况,将目标点标记为质心点和未知样本点,再基于最近邻质心分类对未知样本点进行分类,最后根据重叠天线计算质心点的速度模糊阶数来确定类别中其他点的模糊阶数,从而准确地估计目标实际速度。仿真和实际测试结果表明,改进的算法能有效解决速度模糊问题,提高雷达的成像和环境感知能力。在单目标场景下,改进算法将异常点比例从传统算法的 5.20%降低至 1.73%;在多目标场景下,异常点比例从 21.40%降低至 2.83%。结果表明,改进算法在速度解模糊的准确性和抗干扰性方面具有明显优势,性能优于传统方法。

关键词: 时分复用; 毫米波雷达; 速度模糊; 最近邻质心分类; 重叠天线
中图分类号: TN958 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-2163(2026)07-0131-08

Research on velocity ambiguity resolution algorithm based on nearest neighbor centroid classification

CHEN Jiale[1], JIANG Li[1], YU Yang[2], LI Zhentao[2]
(1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China;
2 Hunan Great-Leo Microelectronics Co., Ltd., Changsha 410003, China)

Abstract: To address the velocity ambiguity problem in time-division multiplexed millimeter-wave radar systems, this paper proposes an enhanced velocity ambiguity resolution algorithm based on nearest-neighbor centroid classification. The algorithm begins by analyzing the phase shifts of the target signal, labeling target points as centroid points or unknown sample points. The unknown sample points are then classified using the nearest-neighbor centroid method. Finally, the velocity ambiguity order of the centroid points is calculated based on the overlapping antennas, which is then used to infer the ambiguity order of other points within the same class, thereby enabling accurate estimation of the target's true velocity. Simulation and experimental results demonstrate that the proposed algorithm effectively resolves the velocity ambiguity issue, significantly improving the radar's imaging and environmental perception capabilities. In single-target scenarios, the algorithm reduces the anomalous point ratio from 5.20% in conventional methods to 1.73%, while in multi-target scenarios, the anomalous point ratio decreases from 21.40% to 2.83%. These results show that the proposed algorithm offers clear advantages in terms of velocity ambiguity resolution accuracy and interference robustness, outperforming traditional methods.

Key words: time division multiplexing; millimeter wave radar; velocity ambiguity; nearest neighbor centroid classification; overlapping antennas

0 引 言

毫米波雷达由于其探测范围广、成本低以及能在雨、雾、雪和夜晚等恶劣环境中工作,已被广泛应用于汽车传感器[1-2]。其通常采用线性调频连续波的信号形式,通过特定的信号处理方式获取周围目标的距离、速度和角度等信息[3]。随着多输入多输出(MIMO)天线系统的发展和应用,毫米波雷达通过各种调制模式在有限的硬件尺寸实现虚拟孔径扩展,从而获得更高的角分辨率。常见的方案有时分复用(TDM)[4]、频分复用(FDM)[5]、码分复用(CDM)[6],这些方案在保持发射信号正交性的同时,大大提高了毫米波雷达的成像和环境感知能力。

在这些多路复用方案中,基于 TDM 的方法因其

基金项目: 湖南省制造业关键产品"揭榜挂帅"项目(2022GXGG012)。
作者简介: 陈佳乐(2000 —),男,硕士研究生。主要研究方向:雷达信号处理。Email:3104426325@qq.com。
收稿日期: 2024-11-25

易于实现而被广泛使用。然而,基于 TDM 的方法的主要缺点是,发射天线数量的增加会导致啁啾重复时间的延长,而啁啾重复时间延长会造成雷达最大无模糊速度降低,测速范围可能不满足实际探测需求。此外,在 TDM MIMO 雷达系统中,多普勒-角度会产生耦合从而影响运动目标的角度估计[7]。因此,速度解模糊是 TDM MIMO 雷达技术中需要特别关注的问题。

一些学者通过研究试图解决 TDM MIMO 雷达系统的速度模糊问题。基于中国剩余定理的速度解模糊是最常见的方法,文献[8]提出了一种利用多个脉冲重复频率的改进算法来解决速度模糊问题。文献[9]提出一种基于中国剩余定理和频谱校正的高精度相移估计器,用于雷达信号处理。文献[10]通过基于密度的聚类算法和中国剩余定理实现速度解模糊。这些方法虽然在一定程度上解决了雷达速度模糊的问题,但需要至少 2 组调频连续波信号,使得雷达系统实时性降低。

文献[11]提出了一种基于重叠天线的速度解模糊方法,通过采用基于重叠天线的收发阵列设计,以损失部分有效孔径的代价高效地解决了雷达速度模糊问题。然而由于相位变化非常敏感,并且容易受到噪声和干扰的影响,这种方法的稳定性较差,在实际应用时容易出现错误。

因此,本文通过引入最近邻质心分类对传统算法进行改进。所提算法通过分析目标信号的相位变化情况对目标点进行标记,再基于最近邻质心分类对未知样本点进行分类,最后根据质心点的重叠天线信号计算簇中目标点的模糊阶数,从而得到目标的实际速度。改进后的算法改善了传统算法易受干扰的问题,并通过仿真和实际测试验证了其性能。

1 MIMO 雷达

1.1 信号模型

毫米波雷达通过周期性地发射线性调频连续波以获取周围场景的信息,发射信号模型可表示为:

$$S_{\mathrm{tx}}(t)=A_{\mathrm{tx}}\exp\left(\mathrm{j}2\pi\left(f_0t+\frac{1}{2}kt^2\right)\right) \tag{1}$$

其中,A_{tx} 表示信号幅度;f_0 表示发射载频;t 表示时间;k 表示调频斜率,计算公式为:

$$k=\frac{B}{T_C} \tag{2}$$

其中,B 表示调频带宽,T_C 表示啁啾持续时间。

发射信号经目标反射后被雷达接收天线(RX)接收,回波信号模型可表示为:

$$S_{\mathrm{RX}}(t)=A_{\mathrm{RX}}\exp\left(\mathrm{j}2\pi\left(f_0(t-\tau)+\frac{1}{2}k(t-\tau)^2\right)\right) \tag{3}$$

其中,A_{RX} 表示反射信号幅度;τ 表示电磁波传播时间,可表示为:

$$\tau=\frac{2(R+vt+nvTc)}{c} \tag{4}$$

其中,R 表示雷达与检测目标之间的距离;v 表示目标的速度;c 表示光速;n 表示第 n 个调频周期。

回波信号与发射信号混频并通过低通滤波后,可得到中频差频信号,该差频信号频率为:

$$f_b=f_R+f_D \tag{5}$$

其中,f_R 表示目标距离带来的频率分量,f_D 表示目标运动带来的频率分量,即多普勒频率。推得的公式为:

$$f_R=\frac{2kR}{c}\qquad f_D=\frac{2vf_0}{c} \tag{6}$$

在雷达信号处理中[12-14],经过一个完整的信号发射和接收周期得到中频信号后,对每个啁啾信号的采样周期执行快速傅里叶变换(FFT)以处理中频信号,从而获得距离频谱,这表示了目标的距离信息。接着,将一帧时间内的所有距离 FFT 的结果再次进行 FFT 处理,以获得多普勒频谱,这表示了目标运动而产生的多普勒频率变化,进而可以确定目标的速度。

由于目标运动所引起相位变化 f_DT_c 的无模糊检测范围为 $[-\pi,\pi]$,可得到最大无模糊多普勒频率 f_D 与 T_c 有关,即 T_c 越长,则 f_D 范围越小,对应的可测量速度范围越小,当实际目标的速度超出了这个范围时,就发生了速度模糊。

1.2 TDM MIMO 雷达系统

单输入多输出(SIMO)雷达是一种配置了单个发射天线和多个接收天线的雷达系统[15-17],根据接收天线间的额外的相位偏移,采用 FFT 的方法对不同接收天线的信号序列进行处理,进而得到目标的角度估计结果。SIMO 雷达的角分辨率为:

$$\theta_{\mathrm{res}}=\frac{\lambda}{Nd\cos\theta} \tag{7}$$

其中,N 表示雷达接收天线数;d 表示 2 个相邻阵元的距离;θ 表示目标与天线法线方向的夹角。

可以看出,SIMO 雷达想要提升角度分辨率只能

通过增加接收天线的数目，硬件消耗非常大[18-20]。而 MIMO 雷达可以通过各种调制发射模式，在较小的硬件消耗下极大地增强角分辨率，TDM MIMO 雷达就是其中应用最为广泛的一种，在特定的天线阵列设计下，TDM MIMO 雷达通过时分复用技术配置发射波形（具体如图 1 所示），可以等效于一个拥有 $N_{tx}N_{rx}$ 个接收天线的 SIMO 雷达（这里，N_{tx} 为时分复用的发射天线数，N_{rx} 为接收天线数），从而获得更高的角分辨率。

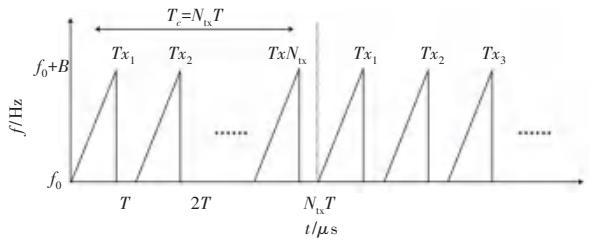


图 1　TDM MIMO 雷达发射波形

Fig. 1　TDM MIMO radar transmission waveform

虽然 TDM MIMO 雷达的角度分辨率相较 SIMO 雷达得到大幅提升，但啁啾时间增加为原来的 N_{tx} 倍，通过上文的结论可以得出啁啾时间的增加会导致最大无模糊速度下降至 $1/N_{tx}$，无法满足毫米波雷达在道路场景中的应用需求，因此迫切需要研究速度解模糊算法以获取更大的速度检测范围。

2　相位关系和速度解模糊算法

2.1　相位关系

在 TDM MIMO 雷达系统中，由于各个发射天线之间发出的信号存在时间差，所以各个虚拟阵元之间除了存在空间上带来的相位差之外，还存在雷达发射期间目标运动带来的相位差异。在均匀线阵中，第 k 个虚拟阵元相较第 1 个虚拟阵元的相位差可以表示为：

$$\Delta\varphi_k = \frac{(n-1)}{N_{tx}}\varphi_{CFAR} + (l-1)\omega \tag{8}$$

其中，n 表示阵元对应的发射天线；φ_{CFAR} 表示 CFAR 得到的多普勒相位；l 表示阵元在空间上的位置；ω 表示相邻阵元空间上的相位差，计算公式为：

$$\omega = 2\pi d\sin\theta/\lambda \tag{9}$$

其中，d 表示相邻阵元间电磁波传播的路程差；λ 表示波长，但这仅适用于目标速度小于雷达最大无模糊速度的情况。

对于目标速度大于雷达最大无模糊速度的情况，通过假设速度模糊阶数可以将相位差表示为：

$$\Delta\varphi_k' = \frac{(n-1)}{N_{tx}}(\varphi_{CFAR} + 2q\pi) + (l-1)\omega \tag{10}$$

其中，q 表示速度模糊阶数，q 的取值范围由发射天线数 N_{tx} 和 CFAR 检测得到的速度 V_{CFAR} 确定：

$$q = \begin{cases} \left[-\dfrac{N_{tx}-1}{2}, \dfrac{N_{tx}-1}{2}\right], & N_{tx}\text{ 为奇数} \\ \left[-\dfrac{N_{tx}}{2}+1, \dfrac{N_{tx}}{2}\right], & N_{tx}\text{ 为偶数且}V_{CFAR}<0, \\ \left[-\dfrac{N_{tx}}{2}, \dfrac{MN_{tx}}{2}-1\right], & N_{tx}\text{ 为偶数且}V_{CFAR}\geqslant 0 \end{cases}$$

$$q \in N \tag{11}$$

此时，目标真实速度和雷达最大无模糊速度 V_{max} 的关系可以表示为：

$$V_{ture} = V_{CFAR} + 2qV_{max} \tag{12}$$

重叠天线解模糊算法通过调整天线阵列的布局从而实现速度解模糊。算法原理是：调整发射通道的阵列间距，使不同发射天线形成的虚拟阵元在空间上实现重叠，重叠的 2 个阵元之间没有空间上的相位差，仅有目标速度带来的相位差。通过设置合适的速度模糊阶数 q，计算 q 值对应速度的相位差对重叠阵元进行补偿。如果用正确的 q 值进行补偿，理想情况下重叠阵元间就没有相位差了；但如果用错误阶数的速度进行补偿，则补偿后的重叠阵元间仍然存在相位差异。为此，可以用这种相位差比较的方法来快速确定目标的正确速度，实现目标速度解模糊。

2.2　基于最近邻质心分类的速度解模糊算法

虽然重叠天线解模糊算法在理想情况下可以快速确定目标的正确速度，实现速度解模糊，然而在实际应用时由于相位的变化极其敏感，易受噪声、干扰和其他目标的影响，容易导致速度解模糊出错，且随着 q 区间的增大，其稳定性也逐步下降。为了缓解上述问题，本文提出了一种改进的基于最近邻质心分类的解模糊算法。

完整的解模糊算法主要包括参数输入部分、相位分析部分、最近邻质心分类部分和速度解算部分。获得目标实际速度的处理流程如下：

步骤 1　参数输入。在实现算法之前，需要确定目标点距离 R、速度 V、重叠通道信息和假设模糊阶数 q。通过 CFAR 检测，可以获得目标的距离和速度数据，根据距离和速度索引提取此索引下的虚拟通道信息，形成通道数据集。q 值根据雷达系统中发射天线的个数和 CFAR 检测得到的速度由式(11)确定。

步骤 2　相位分析。对于每一个输入的目标点，通过分析通道之间的目标信号相位值，得到相邻

天线间的相位差 $\Delta\varphi_k$，并计算其均值和标准差：

$$\Delta\varphi_{\text{mean}} = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\Delta\varphi_k \tag{13}$$

$$\Delta\varphi_{\text{std}} = \text{std}(\Delta\varphi_k) \tag{14}$$

其中，$\Delta\varphi_{\text{mean}}$ 为 $\Delta\varphi_k$ 的均值，表示目标信号的相位变化率，能够在一定程度上揭示目标的角度信息；$\Delta\varphi_{\text{std}}$ 为 $\Delta\varphi_k$ 的标准差，能反映目标信号的稳定性，若目标信噪比较高，受到干扰较弱，相邻天线之间相位的变化将会比较均匀。$\Delta\varphi_{\text{std}}$ 的值较小，速度估计的可信度高，此时将相位变化呈现均匀性的点选为最近邻质心分类的质心。反之，受到干扰的点相位变化比较杂乱，$\Delta\varphi_{\text{std}}$ 较大，速度估计可能出现误差，此时考虑将干扰点标记为最近邻质心分类的未知样本。

步骤 3 最近邻质心分类。将提取到的距离、速度和相位变化率作为分类特征，记录质心 $C_i = \{r_i, v_i, \varphi_i\}$，并计算欧氏距离将未知样本点分配到最近的质心所对应的类别。对于未知样本 $X = \{R, V, \phi\}$，其与每个质心的欧氏距离为：

$$D(X, C_i) = \sqrt{(R - r_i)^2 + (V - v_i)^2 + (\phi - \varphi_i)^2} \tag{15}$$

样本点被分配给距离最小的质心，即：

$$C_{\text{pred}} = \text{argmin}\ D(X, C_i) \tag{16}$$

为了剔除异常点，设定了一个阈值，如果样本点与最近质心的距离超过该阈值，则该样本被视为异常点，不参与分类，以确保分类过程的准确性和可靠性，异常点的阈值可通过经验或交叉验证等方式进行调整。

步骤 4 速度解算。利用最近邻质心分类将所有目标点分类成簇后，提取簇中的质心点对其进行速度解模糊。对于每一个质心点，提取时间上由相邻发射天线发射且在空间上重叠的天线对 $\{R_{x1}, R_{x2}, \cdots, R_{xN}\}$ 和 $\{R_{x1}', R_{x2}', \cdots, R_{xN}'\}$，计算各模糊阶数下的多普勒相位并对重叠天线进行补偿：

$$\{R_{x1}', R_{x2}', \cdots, R_{xN}'\} = \{R_{x1}', R_{x2}', \cdots, R_{xN}'\} \cdot \exp\left(-\text{j}\frac{\varphi_{\text{CFAR}} + 2q\pi}{N_{\text{tx}}}\right) \tag{17}$$

理想情况下，进行正确的相位补偿之后重叠天线对之间的相位差异将会消除，但实际应用时会有各种干扰因素使得相位之间依旧存在差异。计算所有重叠通道对之间的相位差之和，相位差之和最小的模糊阶数即正确的模糊阶数。一旦确定了正确的模糊阶数，就可以利用式(12)中速度与模糊阶数之间的关系来计算簇中目标点的实际速度，随后再利用正确的模糊阶数对簇中所有点进行速度解算。

经过速度解模糊后，雷达的最大探测速度区间恢复到信号时分复用前的范围，此时雷达的最大探测速度区间满足实际要求。

3 仿真建模

3.1 仿真环境

为了验证所提算法的有效性，通过 Matlab 对信号进行建模，加入随机干扰，使用本文算法对目标进行速度解模糊处理，将其与传统算法进行比较，并验证速度补偿后的角度估计性能。仿真实验中的所有参数配置均与实际雷达系统保持一致，包括雷达天线阵列布局、雷达参数设置、信号处理流程等。表 1 给出了仿真实验中的雷达参数设置。

表 1 雷达参数配置

Table 1 Radar parameter configuration

雷达参数	仿真数值
载频 f_0/ GHz	77
调频带宽 B/ GHz	1.28
调制周期/μs	45
采样点数	512
啁啾数	128

仿真和实际测试使用 AWR2243 四级联毫米波雷达的天线阵列(如图 2 所示)。其中相邻阵元间距均为半波长的整数倍，最小阵元间距为半波长。该级联毫米波雷达包含 12 根发射天线和 16 根接收天线，通过特定的 TDM 发射顺序，可以在方位向形成 86 根非重叠虚拟天线以达到 1.4°的角分辨率，同时形成的重叠天线可用于本文提出的速度解模糊算法。

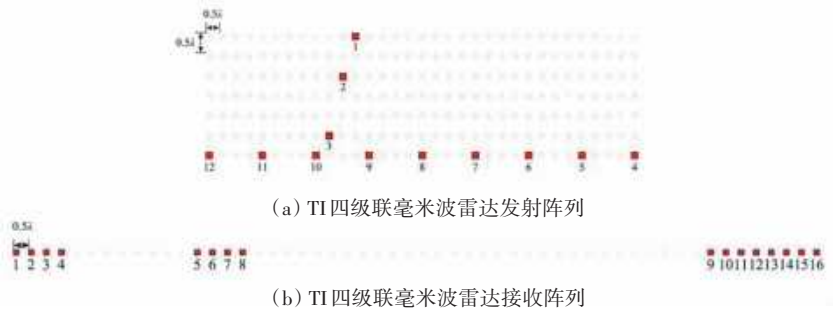
3.2 仿真结果与分析

仿真实验通过模拟一个超过最大无模糊速度的运动目标，对目标的回波信号进行处理以验证本文算法的有效性，目标远离雷达的速度定义为正速度，否则为负速度，模拟目标参数见表 2。

表 2 目标参数

Table 2 Target parameters

目标参数	仿真数值
距离/m	10
速度/(m·s^{-1})	13
水平角度/(°)	15
俯仰角度/(°)	0



（a）TI 四级联毫米波雷达发射阵列

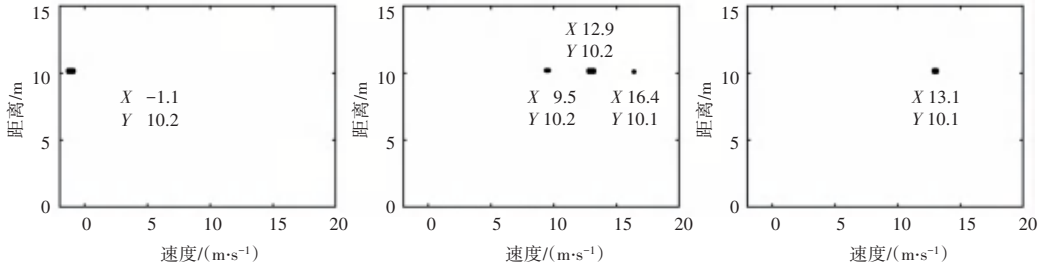
（b）TI 四级联毫米波雷达接收阵列

图 2　天线配置

Fig. 2　Antenna configuration

首先，通过 2D-FFT 对差拍信号进行信息提取，从而获得包含速度和距离信息的 RD 图。随后，将各个通道的数据进行非相干积累，进一步将其输入 CFAR 检测模块中以进行目标检测。图 3（a）为 CFAR 检测出来的目标信息，由于雷达系统的最大检测速度限制，导致检测出的目标速度出现模糊现象，需要进行速度解模糊。

图 3（b）和图 3（c）分别展示了使用传统算法和本文改进算法对目标进行速度解模糊的结果。由图 3（b）、图 3（c）可知，传统算法在进行速度解模糊时，在 9.5 m/s、13.0 m/s 和 16.4 m/s 附近均出现了目标，这意味着部分目标速度被错误估计。相比之下，应用本文改进的算法后，目标速度均集中在 13.0 m/s 左右，实现了对目标速度的准确估计。

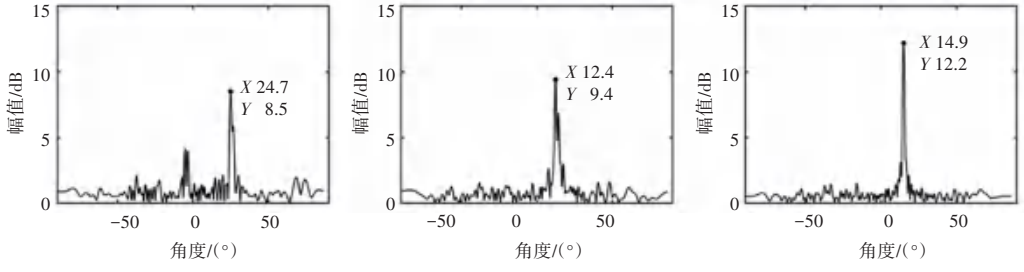


（a）目标信息　（b）传统算法求解结果　（c）本文算法求解结果

图 3　距离和速度估计结果

Fig. 3　Range and velocity estimation results

使用 CFAR 检测结果和速度解模糊结果对目标进行多普勒相位补偿并进行角度估计，角度估计的结果如图 4 所示。图 4（a）展示了使用 CFAR 检测速度对目标进行多普勒相位补偿后的角度估计结果，与实际角度 15°相比存在较大的误差。图 4（b）显示了速度被错误估计为 16.4 m/s 时，使用错误速度进行补偿后的角度估计结果，仍然存在一定误差。而图 4（c）表明，当使用正确的速度对目标进行运动补偿后，得到的测量结果与目标实际角度基本一致。



（a）未进行解模糊　（b）解模糊错误　（c）解模糊正确

图 4　角度估计结果

Fig. 4　Angle estimation results

仿真实验表明，本文改进的算法可以有效地对一定范围内超过雷达最大检测速度的目标进行速度解模糊，得到目标的实际速度，从而实现对目标角度的精确估计。且在有干扰的情况下依旧能保证算法的稳定性，算法性能优于传统重叠天线解模糊方法。

4 实验与分析

4.1 实验环境

为了验证本文算法在实际场景中的有效性,使用 AWR2243 四级联雷达板在道路场景进行数据采集与信号处理,雷达参数和天线阵列与仿真实验一致,将采集到的雷达数据传输到 PC 端进行处理。分别选取单目标场景和多目标场景进行实测验证,实测场景如图 5 所示。



(a) 实验设备 (b) 单目标场景 (c) 多目标场景

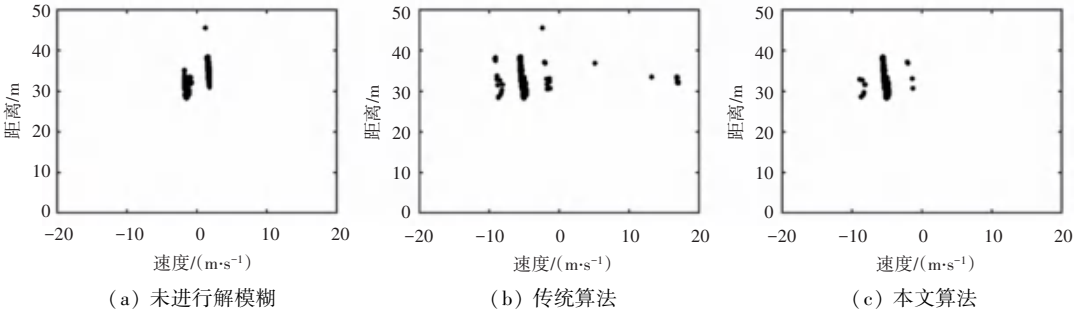
图 5 实测场景

Fig. 5 Tested scenarios

4.2 实验结果与分析

在实际测试中,要准确测量车辆在道路上行驶的速度是不方便的。因此,除了对目标的距离速度进行分析之外,本文还采用一种根据点云图像来评估算法性能的方法。根据仿真实验可知,错误的速度估计会进一步影响角度估计的准确性,这种误差最终会反映在生成的点云图像上。因此,通过分析点云图像,可以评估算法的性能。

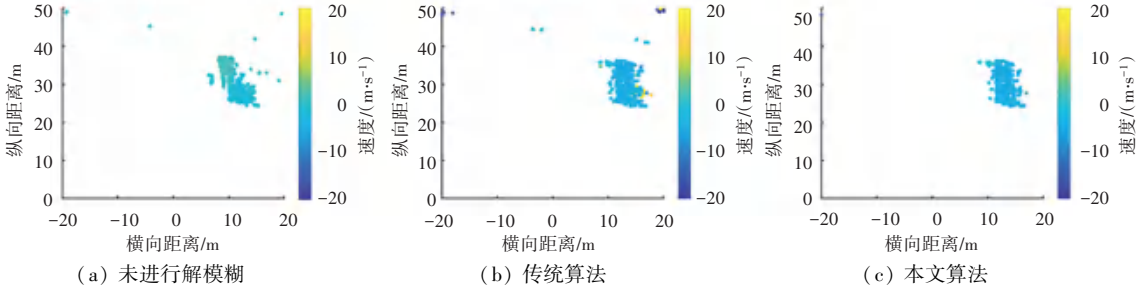
图 6 和图 7 分别展示了单目标场景下目标的距离速度信息和点云图像。图 6(a)为速度解模糊之前 CFAR 的检测结果。速度发生跳变,出现很明显的速度模糊现象,此时形成的点云图像如图 7(a)所示,点云比较分散,不能体现实际目标的大致信息。图 6(b)和图 6(c)分别展示了应用传统算法和本文算法对目标进行速度解模糊的结果。相较之下,本文改进的算法得到的目标速度比传统算法更加集中,更加符合实际场景。图 7(b)和图 7(c)展示了 2 种算法下得到的点云图像,本文改进的算法极大地改善了传统算法的异常点现象,且对于背景环境中的杂波干扰有较好的抑制作用。



(a) 未进行解模糊 (b) 传统算法 (c) 本文算法

图 6 单一目标场景距离和速度估计结果

Fig. 6 Range and velocity estimation results for a single target scenario



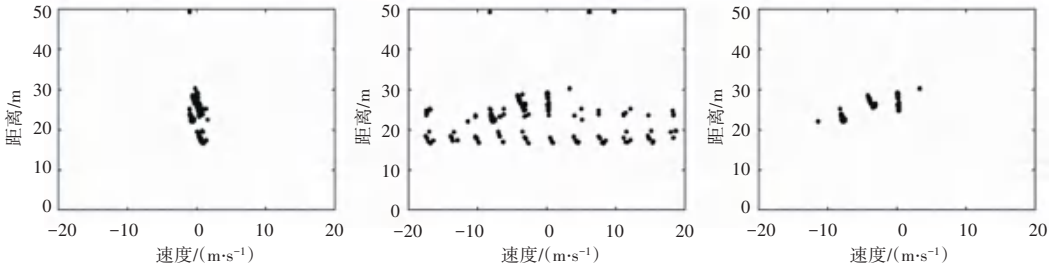
(a) 未进行解模糊 (b) 传统算法 (c) 本文算法

图 7 单一目标场景点云图像

Fig. 7 Point cloud images of a single target scenario

为了验证算法在多目标干扰情况下的性能，继续在多目标场景下对目标进行分析。图 8 为多目标场景下目标的距离速度估计结果，由于车辆间的相互干扰，使用传统算法进行速度解模糊时出现大量虚假点，而使用本文改进的算法能极大地改善此类情况。

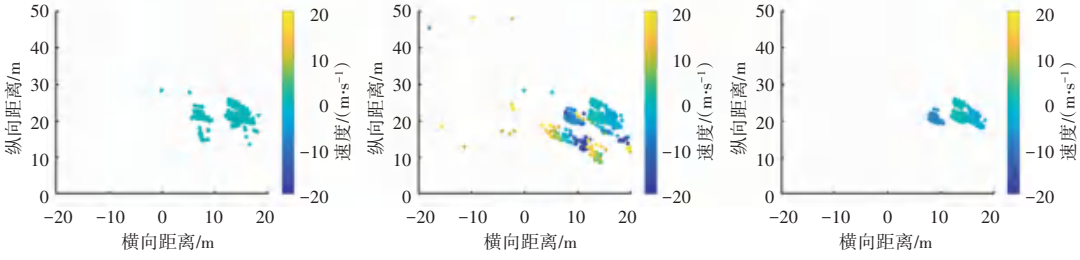
图 9 展示了多目标场景下的点云图像。多目标场景点云图像见图 9(a)、图 9(b)，由于车辆间的相互干扰，导致雷达在近距离点检测到大量虚假目标，应用传统算法进行速度解模糊之后的点云图像中出现大量异常点。相比之下，本文算法则能够保持稳定，受干扰影响较小，且能有效滤除虚假目标，图 9(c)表明在多目标干扰的情况下本文算法依旧能保证雷达的成像能力。



(a) 未进行解模糊　(b) 传统算法　(c) 本文算法

图 8　多目标场景距离和速度估计结果

Fig. 8　Range and velocity estimation results for a multi-target scenario



(a) 未进行解模糊　(b) 传统算法　(c) 本文算法

图 9　多目标场景点云图像

Fig. 9　Point cloud images of a multi-target scenario

根据对多帧数据的统计结果分析可知，在单目标场景下应用传统算法速度解模糊出现异常点的比例为 5.20%，通过改进后本文算法出现异常点的比例仅为 1.73%；在多目标场景下，由于车辆间的互相干扰，传统算法的性能急剧下降，异常比例达到了 21.40%，本文所提算法异常比例依旧稳定在 2.83%。

实测结果表明，在实际交通场景中，基于最近邻质心分类的重叠天线解模糊算法能够有效地解出目标的实际速度，且相较于传统方法具有更高的准确率和更好的抗干扰性，满足实际交通应用需求。

5　结束语

针对毫米波雷达在 TDM MIMO 系统中的速度模糊问题，本文提出了一种基于最近邻质心分类的改进速度解模糊算法。该算法通过分析目标信号的相位变化，并结合最近邻质心分类技术，能够有效处理超过雷达最大无模糊速度的目标，实现了高精度的速度估计。仿真和实际测试结果均验证了该算法的优越性能。与传统方法相比，本文提出的算法在速度解模糊的准确性和抗干扰能力方面表现出显著优势。在单目标和多目标场景下，该算法能够精确估计目标速度，生成的点云图像精度高于传统算法，且异常点比例显著降低。综上所述，本文提出的改进算法不仅能够满足实际交通监测应用的需求，还在提高雷达系统的目标检测和成像能力方面具有重要意义。

参考文献

[1] Zhou T, Yang M, Jiang K, et al. MMW radar-based technologies in autonomous driving: A review[J]. Sensors, 2020, 20(24): 7283.

[2] Sun S Q, Petropulu A P, Poor H V. MIMO radar for advanced driver-assistance systems and autonomous driving: Advantages and challenges[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2020, 37(4): 98-117.

[3] Meinel H H. Commercial applications of millimeterwaves: history, present status, and future trends[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1995, 43(7): 1639-1653.

[4] Zwanetski A, Rohling H. Continuous wave MIMO radar based on time division multiplexing [C]//Proceedings of the 13th International Radar Symposium. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 119-121.

[5] Liu B. Orthogonal discrete frequency-coding waveform set design with minimized autocorrelation sidelobes[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(4): 1650-1657.

[6] He H, Stoica P, Li J. Designing unimodular sequence sets with good correlations: Including an application to MIMO radar[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(11): 4391-4405.

[7] Schmid C M, Feger R, Pfeffer C, et al. Motion compensation and efficient array design for TDMA FMCW MIMO radar systems [C]//Proceedings of the 6th European Conference on Antennas and Propagation. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 1746-1750.

[8] Li Y, Xu C M, Yan X, et al. An improved algorithm for Doppler ambiguity resolution using multiple pulse repetition frequencies [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 1-5.

[9] Huang X, Wang H, Huang G, et al. Doppler shift detection based on Chinese remainder theorem and spectrum correction [C]// Proceedings of the IEEE 23rd International Conference on Digital Signal Processing (DSP). Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 1-5.

[10] Gonzalez H A, Liu C, Vogginger B, et al. Doppler ambiguity resolution for binary-phase-modulated MIMO FMCW radars [C]//Proceedings of the 2019 International Radar Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 1-6.

[11] 江应怀. 一种基于重叠天线的 TDM MIMO 雷达速度解模糊方法[J]. 现代信息科技, 2021, 5(21): 69-73.

[12] 田丰, 刘万, 符渭波, 等. 重叠阵元时分复用 MIMO 雷达多目标参数估计方法研究[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(1): 229-239.

[13] 陈伯孝. 现代雷达系统分析与设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2016.

[14] 黄岩, 张慧, 邓坤, 等. 汽车毫米波雷达信号处理技术综述[J]. 雷达学报, 2023, 12(5): 923-970.

[15] 何子述, 韩春林, 刘波. MIMO 雷达概念及其技术特点分析[J]. 电子学报, 2005, 33(B12): 2441-2445.

[16] Jung J, Lim S, Kim S C, et al. Solving Doppler-angle ambiguity of BPSK-MIMO FMCW radar system[J]. IEEE Access, 2021, 9: 120347-120357.

[17] Baral A B, Torlak M. Joint doppler frequency and direction of arrival estimation for TDM MIMO automotive radars[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2021, 15(4): 980-995.

[18] Sun H, Brigui F, Lesturgie M. Analysis and comparison of MIMO radar waveforms [C]//Proceedings of the 2014 International Radar Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 1-6.

[19] Xu L, Lien J, Li J. Doppler - range processing for enhanced high-speed moving target detection using LFMCW automotive radar [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 58(1): 568-580.

[20] Khan H A, Edwards D J. Doppler problems in orthogonal MIMO radars[C]//Proceedings of the 2006 IEEE Conference on Radar. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 1631806.