

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209919

一种抑制杂波的高精度车载雷达目标检测方法

杨路,周文豪,余翔,宋枚阳,冯春桃

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

摘要:针对 FMCW 毫米波车载雷达目标检测过程中易受杂波影响的问题,提出一种可有效抑制杂波的检测方法。首先运用压扩算法对三帧差法进行改进,使其能够较好分离回波中的杂波和目标信号;然后引入 CFAR 算法滤除回波中的杂波,并运用密度峰值聚类算法寻找目标簇;再将目标簇中目标点的功率值转换成对应的权重,实现对经典重心法的改进,从而有效提升目标定位的准确性。实验结果表明,在停车场、直线路段、城市街道和校园路等 4 种场景中,该方法的检测准确度分别达到 96.5%、95.9%、95.6% 以及 94.4%。同时,在检测速度方面,单帧雷达回波信号的处理周期可达到 0.3 s 左右,可以满足实际应用的需求。

关键词: FMCW 雷达;杂波抑制;三帧差法;运动目标检测

中图分类号: TN959.1 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

High-precision vehicle radar target detection method with clutter suppression

Yang Lu, Zhou Wenhao, Yu Xiang, Song Meiyang, Feng Chuntao

(Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The process of target detection of FMCW mmWave vehicle mounted radar can be easily affected by clutter. To address this issue, a detection method that can effectively suppress clutter is proposed. Firstly, the companding algorithm is used to improve the three-frame difference method. In this way, it can better separate the clutter and target signal in the echo waves. Then, the CFAR algorithm is introduced to filter the clutter in the echoes, and the density peak clustering algorithm is used to find the target clusters. Finally, the power value of the target point in the target cluster is converted into the corresponding weight to improve the classical center of gravity method. The accuracy of target positioning is effectively improved. Experimental results show that the detection accuracy of this method reaches 96.5%, 95.9%, 95.6%, and 94.4% in four scenarios, including parking lot, straight road, urban street and campus road. Meanwhile, in terms of detection speed, the processing cycle of single frame radar echo signal can reach about 0.3 s, which can meet the requirements of practical applications.

Keywords: FMCW radar; clutter suppression; three-frame difference; moving target detection

0 引言

随着智能辅助驾驶系统的广泛应用,道路中运动目标的检测成为一个研究热点。对道路中各种目标的有效识别,可一定程度避免发生交通事故^[1]。目前,计算机视觉和雷达技术是该方向应用研究的热点。

计算机视觉应用于道路中目标检测的研究较多,如 Hsu 等^[2]提出一种基于元数据辅助重识别技术,利用分

布式视觉传感器系统对道路中的目标进行逐帧检测,在正常光照条件情况下有较好的检测效果。针对视觉检测受天气、能见度等影响较大,而调频连续波(frequency modulated continuous wave, FMCW)雷达具有可全天时、全天候工作的特点^[3],文献^[4]采用将视觉传感器和 FMCW 雷达相结合的方案,利用采集的视频和雷达数据训练 YOLO 网络,取得了较高的检测准确度。但由于视觉传感器采集的数据量较大,为了同步处理视频和雷达数据,不得不设置较长的帧周期,导致检测速度较慢。

多发多收 (multiple input multiple output, MIMO) 天线雷达技术的应用极大提升了雷达的探测性能,使得仅依靠雷达精准检测道路中的各种目标成为可能^[5]。Gupta 等^[6]利用 YOLO v3 网络可深层次提取特征的优势,通过雷达的距离多普勒图 (range Doppler map, RDM) 即实现了目标检测功能,但由于未考虑运动目标的时间相关性,导致检测性能不稳定。另一方面,基于计算机视觉的检测方法需要具有强大的计算能力以及庞大的数据资源,目前暂时还难以普及应用。文献[7]通过从雷达的 RDM 中提取行人目标的微多普勒特征并与已建模的腿部模型相匹配,实现对行人目标的检测。该方法与上述基于视觉传感器的方法相比,检测速度具有明显的优势,但其只针对行人目标,也未考虑道路场景中杂波对特征提取过程的影响,使得检测精度不理想。

对于目标检测中的杂波处理问题,传统的动目标显示 (moving target indication, MTI) 算法只能滤除静态杂波,而自适应 MTI (adaptive MTI, AMTI) 算法虽然可抑制动态杂波,但当环境中杂波的数量和种类较多时,其抑制效果微弱^[8]。动目标检测 (moving target detection, MTD) 算法可抑制多个动态杂波,但其抑制静态杂波能力较弱^[9]。有研究人员推导了 FMCW 汽车雷达的简单杂波模型^[10],依据此模型应用恒虚警检测 (constant false alarm rate, CFAR) 算法可降低杂波对目标检测的影响,然而 CFAR 算法的性能随着信杂比 (signal to clutter ratio, SCR) 的降低急剧下降,并且其时间复杂度为 $O(n^2)$,难以应用到嵌入式系统^[11]。文献[12]提出一种基于有序统计的卷积单元平均 CFAR (order statistic convolution-based cell averaging CFAR, OSCCA-CFAR) 算法,解决了经典 CFAR 算法时间复杂度高的问题,但在杂波抑制方面无明显提升。为了提高杂波抑制效果,Li 等^[13]提出了一种自适应消除方法 (adaptive interference cancellation method, AICM),该方法将粒子群算法、自适应消除器和 CFAR 算法有机结合,可将信杂比提升 8~9 dB,但其未解决算法时间复杂度较高的问题。

针对车载雷达应用场景,本文借鉴文献[12]的思路,结合改进的三帧差法和 OSCCA-CFAR 算法进行杂波抑制,实现在保证实时性的同时,提升检测系统抑制杂波的性能;检测阶段则引入密度峰值聚类算法 (clustering by fast search and find of density peaks, DPC) 对杂波抑制后的结果进行聚类^[14];最后将目标信号的功率生成权重系数应用于重心法,对目标所处位置予以确定,从而实现一种可实时抑制杂波的高精度目标检测方法。

1 基于杂波抑制算法的目标检测方法

基于杂波抑制算法的雷达运动目标检测方法包含回

波信号处理、杂波抑制和目标检测 3 个模块。回波信号处理模块对差拍信号进行距离维快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 和多普勒维 FFT^[15];杂波抑制模块即是本文提出的改进三帧差法结合 OSCCA-CFAR 算法对信号中杂波进行抑制;目标检测模块采用密度峰值聚类算法和本文改进的重心法,用于实现目标的定位。以下将对杂波抑制和目标检测的方法进行具体说明。

1.1 基于改进三帧差法的杂波抑制算法

1) 三帧差法抑制杂波原理

当检测场景中出现运动目标时,三帧差法利用时间连续的三帧 RDM 之间所存差异,通过差分运算和阈值过滤等操作滤除杂波,从而提取运动目标的信息^[16]。

FMCW 雷达对回波信号和发射信号进行混频和低通滤波处理后可得到包含目标信息的差拍信号^[17],如式(1)所示。

$$S_b(t) = A \exp \left\{ j2\pi \left[\left(\mu \frac{2R}{c} + \frac{2v}{c} f_0 \right) t + \left(f_0 \frac{2R}{c} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

其中, A 为差拍信号的幅度; $\mu = B/T$ 为 chirp 信号的斜率, B 是带宽, T 为扫频周期; R 为目标到雷达的距离; v 是目标相对雷达的径向速度; f_0 为差拍信号的载波频率。

对差拍信号经过距离维 FFT 和多普勒维 FFT 处理后可得到 RDM,而对 RDM 应用三帧差法可进行目标信号和杂波的分离,以下对三帧差法抑制杂波的过程进行具体说明。

首先,对连续三帧 RDM 进行差分运算,得到两个差值矩阵 Φ_1 和 Φ_2 ,如式(2)所示。

$$\begin{cases} \Phi_1 = |R_{n+1} - R_n| \\ \Phi_2 = |R_n - R_{n-1}| \end{cases} \quad (2)$$

其中, R_n 表示第 n 帧的 RDM, n 表示时间维度;

其次,再对两个差值矩阵进行乘积运算,得到待检测矩阵 Φ :

$$\Phi = \Phi_1 \times \Phi_2 \quad (3)$$

然后,通过求出回波功率的平均值来估算背景杂波的功率,并以此设置杂波过滤的阈值,求解过程如式(4)所示。

$$T = \frac{1}{rd} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^d \varphi_{(i,j)} \quad (4)$$

式中: r 表示待检测矩阵 Φ 的距离单元数, d 为 Φ 的多普勒单元数, $\varphi_{(i,j)}$ 表示位于 Φ 中 (i, j) 处的功率值。最后,若满足 $\varphi_{(i,j)} \geq T$ 则将此单元标记为目标点,否则视为杂波,将其滤除。对 $\varphi_{(i,j)}$ 进行的二值化处理如式(5)所示。

$$\varphi'_{(i,j)} = \begin{cases} 1, & \varphi_{(i,j)} \geq T \\ 0, & \varphi_{(i,j)} < T \end{cases} \quad (5)$$

其中,‘1’值代表目标,‘0’值代表杂波。

仿真结果显示,三帧差法应用于车载雷达目标检测领域时存在两个问题:1)使用式(4)设置过滤阈值时需要满足杂波功率与目标信号功率存在较大差距的条件,但在大多数的实际环境中两者差距并不大,导致设置的阈值无法有效地滤除杂波;2)式(5)所示的二值化处理方式,丢弃了目标信号的幅度特征,对后续目标分类工作带来障碍。

2)改进三帧差法抑制杂波

针对三帧差法阈值设置过程中存在的不足,提出对回波功率进行压扩处理,并将检测结果映射到原始 RDM 的方法,以在保留目标信号幅度特征的同时更好地抑制杂波。以下将对三帧差法的改进之处进行详细说明。

为了减小与距离相关的信号衰减对目标检测的影响,对经过差分和乘积运算的 RDM 进行功率归一化操作,如式(6)所示。

$$P_{(i,j)} = \varphi_{(i,j)}^2 \left(\frac{1}{rd} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^d \varphi_{(i,j)}^2 \right)^{-1} \quad (6)$$

式中: $P_{(i,j)}$ 代表功率归一化后距离多普勒矩阵 (i,j) 处的功率值。

当杂波功率和目标信号功率之间的差距较小时,经过功率归一化后,差距会进一步被缩小,不利于实现两者的分离,因此需进行功率放大操作,具体方法如式(7)所示。

$$P'_{(i,j)} = \begin{cases} \frac{\alpha P_{(i,j)}}{1 + \ln \alpha}, & 0 \leq P_{(i,j)} \leq \frac{1}{\alpha} \\ \frac{1 + \ln(\alpha P_{(i,j)})}{1 + \ln \alpha}, & \frac{1}{\alpha} \leq P_{(i,j)} \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P'_{(i,j)}$ 为放大后的功率, α 为扩张因子。

通过式(6)和(7)实现的压扩方法,可以尽可能的将待检测矩阵中的目标信号和杂波分离到两个互不相交的区间内,再根据两者的分离程度设置检测阈值 T , 阈值 T 具体的设置方法如式(8)所示。

$$T = \frac{(1 - \beta)}{rd} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^d P'_{(i,j)} + \beta e_{\max} \quad (8)$$

其中, e_{\max} 为功率放大后 RDM 中的最大值, β 是表征目标信号和杂波分离程度的比例系数。

在得到阈值后,通过 $P'_{(i,j)}$ 对原始的距离多普勒矩阵进行类二值化处理和映射操作,具体的处理方法如式(9)所示。

$$R'_{(i,j)} = \begin{cases} R_{(i,j)}, & P'_{(i,j)} > T \\ 10 \lg(R_{(i,j)}), & P'_{(i,j)} \leq T \end{cases} \quad (9)$$

式中: $R'_{(i,j)}$ 为映射后的 RDM 中 (i,j) 处单元的功率值。

由此,改进的三帧差法通过压扩处理首先使回波信号中的目标信号和杂波得以分离,然后通过映射操作获得保留了幅度特征的距离多普勒图,最后运用 OSCCA-

CFAR 算法对其中的杂波进行滤除,即可得到滤除大部分杂波的 RDM。

3)杂波抑制算法仿真分析

为了验证本文所提出杂波抑制算法的可行性,对其性能和时间复杂度进行仿真分析。

本文通过信杂比 SCR 评价杂波抑制算法的性能,其计算方式如式(10)所示。

$$SCR = R'_t / \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^d R'_{(i,j)} \quad (10)$$

其中, R'_t 为目标的功率。

雷达回波信号的仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 雷达仿真配置

Table 1 Radar simulation configuration

参数类型	参数	值
雷达基础参数	载波频率/GHz	77
	带宽/MHz	200
	扫频周期/ μ s	30
	FFT 点数	128
	chirp 数	128
	采样频率/MHz	400
目标相关参数	距离/m	40
	速度/($m \cdot s^{-1}$)	20

为了验证本文改进三帧差法抑制杂波的效果,在回波中分别添加服从高斯分布、瑞利分布和指数分布的 3 种杂波,3 种类型的杂波参数设置如表 2 所示。

表 2 杂波参数配置

Table 2 Clutter parameter configuration

杂波分布类型	参数	值
高斯分布	均值	40
	标准差	4
瑞利分布	参数 σ	4
指数分布	参数 λ	0.25

从仿真图 1 可看出,回波中的杂波服从高斯分布时,本文算法不仅可以滤除距离多普勒图中的静态杂波,并且与目标信号相似的动态杂波也被很好抑制。

通过式(10)可得到抑制杂波前后的信杂比,对比结果如表 3 所示。

回波中的杂波服从高斯分布是一种比较理想的情况,为了模拟更加复杂的实际环境,在回波中混叠服从瑞利分布的杂波,采用改进三帧差法进行杂波抑制的仿真图如图 2 所示。

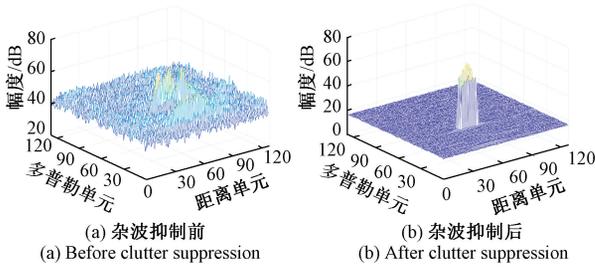


图1 高斯分布杂波的抑制效果

Fig.1 Gaussian clutter suppression performance

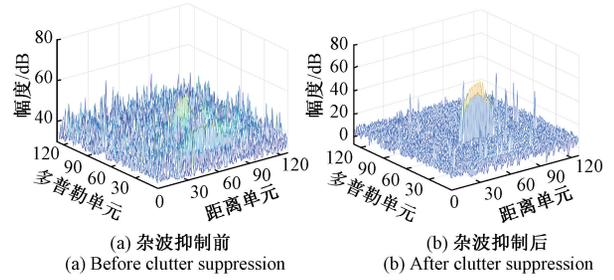


图3 指数分布杂波的抑制效果

Fig.3 Exponential clutter suppression performance

表3 服从高斯分布杂波的信杂比对比

Table 3 Comparison of SCR for Gaussian clutter

杂波抑制处理状态	信杂比/dB
杂波抑制前	27
杂波抑制后	50

表5 指数分布杂波的信杂比对比

Table 5 Comparison of SCR for exponential clutter

杂波抑制处理状态	信杂比/dB
杂波抑制前	15
杂波抑制后	27

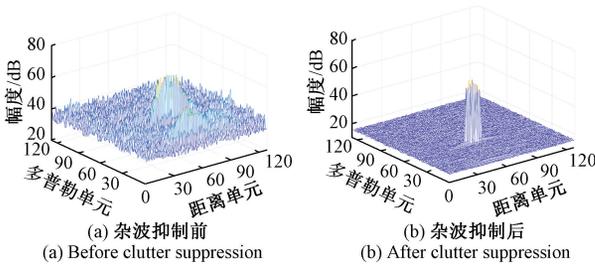


图2 瑞利分布杂波的抑制效果

Fig.2 Rayleigh clutter suppression performance

从图2中可看出,回波中服从瑞利分布的杂波也得到很好的抑制。混合瑞利分布杂波的回波经过杂波抑制前后的信杂比对比如表4所示。

表4 服从瑞利分布杂波的信杂比对比

Table 4 Comparison of SCR for Rayleigh clutter

杂波抑制处理状态	信杂比/dB
杂波抑制前	24
杂波抑制后	46

为了验证改进三帧差法在存在较多与目标信号相似杂波的场景中抑制杂波的性能,在回波中混叠服从指数分布的杂波模拟现实中的复杂场景。原始回波信号和杂波抑制后的信号仿真图如图3(a)、(b)所示。

从图3(b)可知,杂波抑制完成之后仍存在少量的干扰,但其呈现稀疏性,不影响后续目标检测工作。通过表5可知,在混有服从指数分布杂波的信号中,本文算法可将信杂比提升12 dB左右。

在时间复杂度方面,改进的三帧差法杂波抑制算法与其他4种杂波抑制算法的对比结果如表6所示。

表6 杂波抑制算法时间复杂度对比

Table 6 Comparison of time complexity of clutter suppression algorithms

算法	时间复杂度
MTI	$O(n)$
AMTI	$O(n^2)$
MTD	$O(n)$
AICM	$O(n^2)$
本文算法	$O(n)$

从表6中可看出,本算法的时间复杂度与MTD、MTI一样都为 $O(n)$,优于AICM和AMTI算法。

1.2 基于改进重心法的目标定位

在本文提出的目标检测方法中,杂波抑制后的信号经目标检测模块应用聚类算法和改进的重心法来实现最终的目标检测。由于滤除杂波后的目标信号具有稀疏性特征,考虑采用聚类速度较快的DPC算法寻找目标簇,再以目标信号功率为依据应用重心法进行目标定位。

假设经DPC聚类后确定的某一个目标簇中存在 n 个目标点,那么可通过这些目标点的坐标求解此目标簇的形心,以代表目标实际位置。实验发现,该方法确定的目标位置存在较大误差,本文依据目标信号的峰均功率比(peak to average ratio, PAR)较大的原理,改进重心法以精确计算目标所处位置。改进计算方式如式(11)和(12)所示。

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \left(\sum_{i=1}^n w_i x_i, \sum_{i=1}^n w_i y_i \right) \quad (11)$$

式中: (\hat{x}, \hat{y}) 是通过估算得到的目标位置, (x_i, y_i) 为目标簇中第 i 个目标点在 \mathbf{R}' 中的位置, w_i 是第 i 个目标点的权重系数, 其确定方式如式 (12) 所示。

$$w_i = R'_{(x_i, y_i)} \left[\sum_{i=1}^n R'_{(x_i, y_i)} \right]^{-1} \quad (12)$$

式中: $R'_{(x_i, y_i)}$ 是 \mathbf{R}' 中 (x_i, y_i) 处的功率值。

改进的重心法通过目标簇中各目标点的功率生成对应的权重, 然后对目标点的坐标进行加权求和, 从而获得了更为精确的目标坐标。

2 杂波抑制目标检测方法的实验验证

2.1 几种典型场景下目标检测实验

本文通过使用公开数据集 CRUW Dataset^[18] 验证目标检测方法的性能, 该数据集包括了使用相机和 TI AWR1843 分别采集的路口、直行路段、停车场和城市街道等多个场景的数据。为验证本文目标检测方法的泛用性和鲁棒性, 综合考虑了场地、天气以及目标类型 3 个方面的因素, 从数据集中选取了如图 4 所示的 4 个场景。

从图 4 的原始 RDM 中可以看到, 真实场景下的 RDM 中包含着大量的杂波, 尤其是在场景 2、场景 3 和场景 4 这类道路场景中杂波与目标信号具有相似的特征, 对目标检测会产生严重干扰。

4 个场景的信息如表 7 所示。

表 7 场景具体信息
Table 7 Scene specific information

场景	天气	场地	目标
场景 1	多云	停车场	行人
场景 2	晴	直线路段	行人、汽车
场景 3	晴	城市街道	汽车
场景 4	晴	校园路段	汽车

对图 4 所选的 4 个典型场景进行目标检测, 检测结果如图 5 所示, 图 5 中圆形和六边形区域代表行人目标, 五角星区域代表汽车目标, 不在上述区域内的点为残留的噪声点。

设在图 4 中的某个场景共采集了 N 帧回波信号数据, 那么在检测时, 若能正确检测到目标, 则将当前帧的标记 F_i 记为 1, 否则记为 0, 如式 (13) 所示。

$$F_i = \begin{cases} 1, & \text{正确检测} \\ 0, & \text{错误检测} \end{cases} \quad (13)$$

对一个场景重复进行 L 次检测, 利用式 (14) 得到每次检测的准确度。



(a) 场景1停车场
(a) Scene 1 Parking lots



(b) 场景2直线路段
(b) Scene 2 Straight lots



(c) 场景3城市街道
(c) Scene 3 City streets



(d) 场景4校园路段
(d) Scene 4 Campus road

图 4 检测场景实况(左)和原始 RDM(右)

Fig. 4 Detection scenarios in real life (left) and RDM (right)

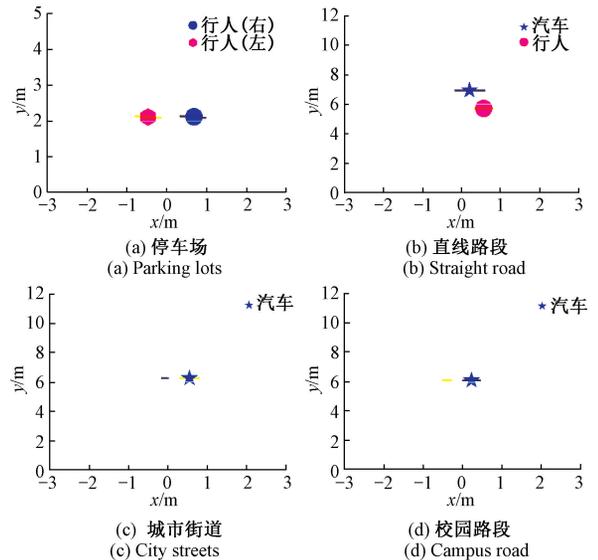


图 5 4 种场景下的检测结果

Fig. 5 Detection results in four scenarios

$$AR_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i \times 100\% \quad (14)$$

其中, AR_l 表示第 l 次检测的准确度。

最后通过式 (15) 得到此场景下最终的检测准确度。

$$AR_{final} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L AR_l \quad (15)$$

为了验证上述目标检测方法的检测准确度, 本文针对图 4 中所列四个场景分别各进行了 10 次检测, 并与应用 MTI、AMTI 和 MTD 杂波抑制算法的检测方法进行了对比, 检测准确度对比如表 8 所示。

表 8 检测准确度对比

Table 8 Detection accuracy comparison %

算法	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4
MTI	92.9	93.3	91.7	90.3
AMTI	94.7	95.2	93.4	92.6
MTD	93.7	93.5	92.8	91.2
AICM ^[10]	95.8	96.4	95.3	94.1
本文算法	96.5	95.9	95.6	94.4

从表 8 中可以看到, 本文提出的检测方法在 4 个场景中均有较高的检测准确度, 尤其是在场景 3 和场景 4 这类具有强杂波的场景下具有明显的优势。

2.2 目标检测速度对比

目标检测速度主要取决于杂波抑制算法、CFAR 以及聚类算法。本文通过杂波抑制算法和 CFAR 大幅减少了聚类算法需处理的数据, 使得聚类算法耗时仅在 1~10 ms, 在实际应用中检测时延感知不明显。而在 CFAR 算法和聚类算法相同的前提下, 若采用不同的杂波抑制算法进行目标检测, 可测试不同的杂波抑制算法在实际检测过程中对检测速度的影响。

检测速度方面的性能通过平均检测周期 τ 来进行评估, 将检测流程的检测周期记为 t , 那么平均检测周期可通过式 (16) 进行估算。

$$\tau = \frac{1}{NL} \sum \sum t \quad (16)$$

其中, N 为检测的回波帧数, L 为检测次数。

在应用不同杂波抑制算法下, 几种目标检测方法在检测速度方面的对比情况如图 6 所示。

通过图 6 可以看到, 本文基于改进三帧差法的目标检测方法的检测速度比 MTI 的慢, 这是由于在杂波抑制过程中进行了目标信号和杂波的分离所导致的, 这也是本文检测算法准确度更高的原因。图中也可看出, 本检测方法的检测速度相较检测精度也较高的 AICM 的方法具有较明显的优势。此实验结果证明, 本检测方法以更快的检测速度获得了较好的目标检测准确度。

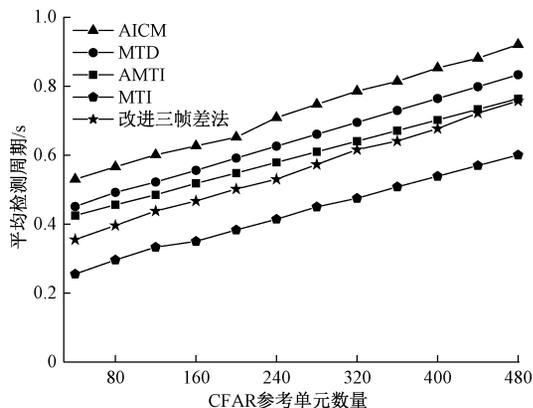


图 6 检测速度对比

Fig. 6 Detection speed comparison

3 结 论

本文提出一种车载雷达目标检测方法, 运用改进的三帧差法分离杂波和目标信号, 然后通过 OSCCA-CFAR 算法对杂波进行两级滤除, 最后通过 DPC 和改进的重心法实现目标的最终定位检测。实验结果表明, 在较简单的道路环境中, 本文提出的检测方法能够达到 96.5% 左右的检测准确度, 即使在行人、非机动车和机动车 3 种目标混合的环境中准确度也可达到 94% 左右。检测速度在 CFAR 算法参考单元数量取值 80 左右时可达 0.3 s 左右, 完全可以满足实际应用的需求。

综上所述, 本文提出的检测方法在要求高准确度和实时性的智能驾驶辅助系统中具有明显的应用参考价值。由于改进的三帧差法在抑制杂波时最大程度地保留了目标信号的特征, 故后续还可进一步通过提取这些特征以实现目标的分类。

参考文献

- [1] WALDSCHMIDT C, HASCH J, MENZEL W. Automotive radar—From first efforts to future systems[J]. IEEE Journal of Microwaves, 2021, 1(1): 135-148.
- [2] HSU H M, CAI J, WANG Y, et al. Multi-target multi-camera tracking of vehicles using metadata-aided Re-id and trajectory-based camera link model [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 5198-5210.
- [3] 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. ZHENG R, LI F D. Navigation system of security mobile robot based on FM millimeter wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3): 105-113.

- [4] KOSUGE A, SUEHIRO S, HAMADA M, et al. MmWave-YOLO: A mmWave imaging radar-based real-time multi-class object recognition system for adas applications[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-10.
- [5] LIU X, HUANG T, SHLEZINGER N, et al. Joint transmit beamforming for multiuser MIMO communications and MIMO radar[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2020, 68: 3929-3944.
- [6] GUPTA S, RAI P K, KUMAR A, et al. Target classification by mmWave FMCW radars using machine learning on range-angle images [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(18): 19993-20001.
- [7] HELD P, STEINHAUSER D, KOCH A, et al. A novel approach for model-based pedestrian tracking using automotive radar[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(7): 7082-7095.
- [8] WILL C, VAISHNAV P, CHAKRABORTY A, et al. Human target detection, tracking, and classification using 24GHz FMCW radar[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(17): 7283-7299.
- [9] NALLABOLU P, ZHANG L, HONG H, et al. Human presence sensing and gesture recognition for smart home applications with moving and stationary clutter suppression using a 60 GHz digital beamforming FMCW radar[J]. IEEE Access, 2021, 9: 72857-72866.
- [10] MA Y Z, CUI C, KIM B S, et al. Road clutter spectrum of BSD FMCW automotive radar [C]. 2015 European Radar Conference (EuRAD), IEEE, 2015: 109-112.
- [11] ALVARADO M C L, GARCÍA F D A, JIMÉNEZ L P J, et al. Performance evaluation of SOCA-CFAR detectors in weibull-distributed clutter environments [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 1-5.
- [12] XU C, WANG F, ZHANG Y, et al. Two-level CFAR algorithm for target detection in mm Wave radar [C]. 2021 International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA), IEEE, 2021: 240-243.
- [13] LI Y, WANG C, LI F, et al. An adaptive interference cancellation method for automotive FMCW radar based on waveform optimization [C]. IET International Radar Conference (IET IRC 2020), 2020:666-670.
- [14] 乐燕芬,许远航,施伟斌. 基于 DPC 指纹子空间匹配的室内 WiFi 定位方法 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11):106-114.
- LE Y F, XU Y H, SHI W B. WiFi fingerprint based indoor positioning with subspace matching and DPC[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 106-114.
- [15] CUI H, DAHNOUN N. High precision human detection and tracking using millimeter-wave radars [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2021, 36(1): 22-32.
- [16] 崔杰, 胡长青, 徐海东. 基于帧差法的多波束前视声呐运动目标检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 169-176.
- CUI J, HU CH Q, XU H D. Moving target detection for multi-beam forward-looking sonar based on frame-difference method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 169-176.
- [17] MORRIS P J B, HARI K V S. Detection and localization of unmanned aircraft systems using millimeter-wave automotive radar sensors [J]. IEEE Sensors Letters, 2021, 5(6): 1-4.
- [18] WANG Y, JIANG Z, LI Y, et al. RODNet: A real-time radar object detection network cross-supervised by camera-radar fused object 3D localization [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2021, 15(4): 954-967.

作者简介



杨路, 分别于 2003 和 2011 年于重庆邮电大学获得学士学位和硕士学位。现为重庆邮电大学高级工程师, 主要研究方向为通信新技术及雷达信号处理。

E-mail: yanglu@cqupt.edu.cn

Yang Lu received her B.Sc. degree and M.Sc. both from Chongqing University of Posts and Telecommunications in 2003 and 2011, respectively. She is currently a senior engineer at Chongqing University of Posts and Telecommunications. Her main research interests include new communication technology and radar signal processing.



周文豪(通信作者), 2019 年于泰山学院取得学士学位, 现为重庆邮电大学在读研究生, 主要研究方向为毫米波雷达目标检测与分类。

E-mail: 15206844150@163.com

Zhou Wenhao (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Taishan University in 2019. He is a master student at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include mmWave radar target detection and classification.