

# 基于等分别除的毫米波雷达恒虚警检测研究

符阳懿,冯永新,钱博

(沈阳理工大学 信息科学与工程学院,沈阳 110159)

**摘要:**为解决车载毫米波雷达目标检测过程中在相邻多目标情况下会提高检测门限值,从而导致目标遮蔽现象,引发传统恒虚警(constant false alarm rate, CFAR)检测在多目标环境下产生漏检的问题,提出一种等分别除恒虚警检测算法(equipartition deletion CFAR, ED-CFAR)。通过将目标两侧的参考单元等分取平均值得到子参考单元,对大于所有参考单元平均值的部分进行处理后排序,剔除部分较大子参考单元,计算得到门限值,与目标的信号幅度进行比较判断目标是否存在。仿真结果表明,在多目标检测的仿真场景下,信噪比为10 dB时,ED-CFAR算法的检测概率比单元平均恒虚警(CA-CFAR)算法提高0.39,比筛选平均恒虚警(CMLD-CFAR)算法提高了0.08,有效解决了传统均值类恒虚警检测在相邻多目标条件下的遮蔽问题。

**关键词:**毫米波雷达;恒虚警检测;目标遮蔽;多目标检测

中图分类号: TN957.51 文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2024.02.004

## A Millimeter Wave Radar CFAR Algorithm Based on Equipartition Deletion

FU Yangyi, FENG Yongxin, QIAN Bo

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of raising the detection threshold in the condition of adjacent multiple targets, which leads to the missed detection in the multi-target environment, a millimeter wave radar CFAR algorithm based on equipartition deletion is proposed. The reference units on both sides of the target are equally divided into average values to obtain sub-reference units. Parts larger than the average of all reference units are sorted after processing. Some larger sub-reference units are eliminated. The threshold is calculated and compared with the signal amplitude of the target to determine whether the target exists. When the SNR is 10 dB, simulation results show that detection probability of ED-CFAR is 0.39 higher than that of cell averaging CFAR (CA-CFAR) and 0.08 higher than that of censored mean level detector (CMLD-CFAR). The target masking problem of mean level CFAR is effectively solved in the case of adjacent multiple targets.

**Key words:** millimeterwave radar; constant false alarm rate; target masking; multi-target detection

近年来,毫米波雷达已被广泛应用于汽车自动驾驶<sup>[1]</sup>、交通管制<sup>[2]</sup>、避障预警<sup>[3]</sup>等技术中,随着使用范围的扩大,目标检测环境更加复杂。恒虚警(constant false alarm rate, CFAR)<sup>[4]</sup>检测技术

作为毫米波雷达目标检测的关键技术,对于目标检测性能起到决定性作用,是决定毫米波雷达能否准确及时地检测出目标的重要因素,也是后续一切规划和决策的基础。

CFAR 检测方法主要包括两大类,分别为均值 (ML) 类恒虚警检测和有序统计 (OS) 类恒虚警检测。均值类恒虚警主要包括单元平均恒虚警 (CA-CFAR)<sup>[5]</sup>、最小选择恒虚警 (SO-CFAR)<sup>[6]</sup> 与最大选择恒虚警 (GO-CFAR)<sup>[7]</sup>,核心思想是利用待测单元附近的临近单元,即参考单元求出均值作为背景杂波的功率估值;基本的有序统计类 CFAR 算法包括有序统计恒虚警 (OS-CFAR)<sup>[8]</sup>、筛选平均恒虚警 (CMLD-CFAR)<sup>[9-10]</sup>、剔除平均恒虚警 (TM-CFAR)<sup>[11]</sup> 等,有序统计类恒虚警是将参考单元进行排序后进行处理。一般来说,均值类恒虚警检测在均匀的单目标环境下具有极佳的检测性能,但是当有多个目标出现时,CA-CFAR 和 GO-CFAR 的检测性能会迅速下降,出现目标遮蔽效应,有序类恒虚警检测相较于部分均值类恒虚警检测而言,在一定程度上提高了多目标环境下的检测性能。

CFAR 检测的参考单元的划分是根据雷达的工作模式和需要检测的目标类型来确定的,参考单元的划分通常是固定距离范围内的一个小区域,比如 1 m 或者 0.1 m,具体取决于雷达所采用的工作模式和数据处理方法,参考单元的数据通常是雷达返回信号的强度。在毫米波雷达目标检测过程中,在选择参考单元时,还要考虑功率泄漏情况,要待检测目标所在单元和参考单元之间留有保护单位,为防止漏检,保护单元的大小需要根据目标大小等因素来确定。在实际应用场景中,当同时存在两个或者两个以上的目标,且一个目标位于待检测单元,而其余一个或者多个目标落在参考单元内时,会出现目标遮蔽现象<sup>[12]</sup>。假设参考单元内的目标回波功率大于周围杂波和噪声的功率,目标回波功率的存在会提高噪声水平的估计值,CFAR 的检测门限会提高,待检测目标被遮蔽,这是因为检测门限值提高导致检测概率降低,大大增加了丢失目标的可能性<sup>[13]</sup>。

为解决传统均值类恒虚警检测在相邻多目标情况下会提高检测门限值,从而导致目标遮蔽问题,且实现多目标环境下参考单元损失数量相同同时相较于 CMLD-CFAR 算法提高检测性能,本文提出一种基于车载毫米波雷达多目标检测的等分别除恒虚警 (equipartition deletion CFAR, ED-CFAR) 检测算法,通过对参考单元做等分处理取平均值后与所有参考单元平均值进行比较,引入门限调节系数  $P (P \leq 1)$ ,对大于参考单元平均值的部分与系数  $P$  相乘,排序后剔除掉部分最大子参考单元后的数据进行处理后得到门限值,检测

目标是否存在,消除均值类恒虚警检测过程中出现的目标遮蔽现象,提高目标检测性能<sup>[14]</sup>。

## 1 CMLD-CFAR 特性分析

在多目标环境下,CMLD-CFAR 相比于部分传统均值类 CFAR 较为有效地解决了目标遮蔽问题<sup>[15]</sup>,具有更好的检测性能。CMLD-CFAR 的原理框图如图 1 所示。



图 1 CMLD-CFAR 检测原理框图

Fig. 1 CMLD-CFAR schematic diagram

CMLD-CFAR 检测器对两侧  $2n$  个参考单元的数据  $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$  和  $Y_i (i = 1, 2, \dots, n)$  全部一起排序,排序后的结果记为  $U_i (i = 1, 2, \dots, 2n)$ ,再删除  $r$  个较大参考单元,剩余  $2n - r$  个参考单元,对剩余的所有参考单元求和取平均值  $Z$  作为检测器对杂波功率水平的估计,再与门限因子相乘得到检测门限  $T$ <sup>[16]</sup>,将待检测单元与检测门限进行比较,判断是否存在目标。CMLD-CFAR 的杂波功率水平的估计  $Z$  为

$$Z = \frac{1}{2n - r} \sum_{i=1}^{2n-r} U_i \quad (1)$$

检测门限  $T$  为

$$T = \alpha \times Z = \frac{\alpha}{2n - r} \sum_{i=1}^{2n-r} U_i \quad (2)$$

比较器用来将接收到的雷达信号与设定的门限值进行比较,判断是否存在目标,如式(3)所示。

$$\begin{cases} H_0, A \leq T \\ H_1, A > T \end{cases} \quad (3)$$

待检测单元的信号幅度为  $A$ ,若  $A$  大于  $T$ ,则目标存在,记为  $H_1$ ,否则目标不存在,记为  $H_0$ 。但 CMLD-CFAR 通过删除部分较大参考单元来调整门限值,如果消除的参考单元数量较多,就可能丢失需要检测的目标信息,无法进行有效的检测。ED-CFAR 在删除较大参考单元的数量调整检测

门限的基础上,引入门限调节系数  $P$  降低较大子参考单元对门限值的影响,能够保证参考单元损失较小同时减少丢失目标的可能,提高目标检测性能。

## 2 ED-CFAR 算法原理

通过上文分析可知,在多目标环境下,均值类恒虚警会受到参考单元内的目标影响,导致检测

性能下降。本文基于 CMLD-CFAR 和 CA-CFAR 的处理过程,提出 ED-CFAR 算法,既可以通过消除目标两侧的参考单元的个数对后续噪声功率级估计值的影响,还可以通过减小目标频谱单元进行目标有效检测。算法原理框图如图 2 所示。

由图 2 可见,将待检测单元  $A$  两侧参考单元进行二等分处理,得到子参考单元  $Z_1, Z_2, \dots, Z_{n/2}$  和  $Z'_1, Z'_2, \dots, Z'_{n/2}$  分别为

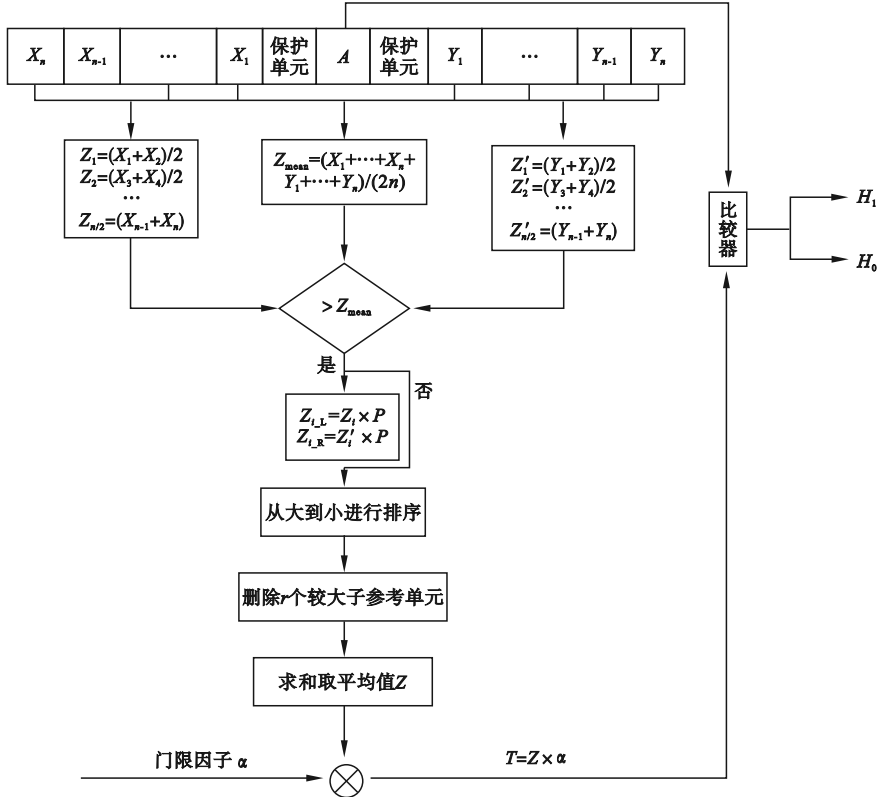


图 2 ED-CFAR 检测原理框图

Fig. 2 ED-CFAR schematic diagram

$$\begin{cases} Z_1 = (X_1 + X_2)/2 \\ Z_2 = (X_3 + X_4)/2 \\ \dots \\ Z_{n/2} = (X_n + X_{n-1})/2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} Z'_1 = (Y_1 + Y_2)/2 \\ Z'_2 = (Y_3 + Y_4)/2 \\ \dots \\ Z'_{n/2} = (Y_n + Y_{n-1})/2 \end{cases} \quad (5)$$

所有参考单元的平均值为

$$Z_{\text{mean}} = \frac{1}{2n} \left( \sum_{i=1}^n X_i + \sum_{i=1}^n Y_i \right) \quad (6)$$

若子参考单元的平均值  $Z_i$  或  $Z'_i$  大于噪声功率估计值  $Z_{\text{mean}}$ ,为了降低较大参考单元影响门限值的计算,则将相应的子参考单元的平均值与系

数  $P$  相乘;否则保留原值。

由 ED-CFAR 算法示意图可知,得到的噪声功率的估计值为

$$Z_{iL} = \begin{cases} Z_i \times P, & Z_i > Z_{\text{mean}} \\ Z_i, & Z_i < Z_{\text{mean}} \end{cases} \quad (7)$$

$$Z_{iR} = \begin{cases} Z'_i \times P, & Z'_i > Z_{\text{mean}} \\ Z'_i, & Z'_i < Z_{\text{mean}} \end{cases} \quad (8)$$

$Z_{iL} (i=1, 2, \dots, n)$  和  $Z_{iR} (i=1, 2, \dots, n)$  分别为待检测目标左侧和右侧处理后的子参考单元,通过式(7)和式(8)在参考单元损失很小的基础上降低了较大子参考单元对门限值的影响。由图 2 可知,对所有子参考单元进行排序,排序后的结果记为  $U_i (i=1, 2, \dots, n)$ , 剔除  $r$  个较大的子参考单元样本,剩余  $n-r$  个子参考单元求和取平均值

后的结果即为待检测单元  $A$  两侧参考单元得到的新的噪声功率的估计值  $Z$ , 如式(9)所示。

$$Z = \frac{1}{n-r} \sum_{i=1}^{n-r} U_i \quad (9)$$

通过式(9)减小了较大参考单元对门限值影响, 如果  $r$  过大, 可能会丢失需要检测的目标信息。因此,  $r$  取值不能过大。最后将得到的新的噪声功率估计值  $Z$  与门限因子  $\alpha$  相乘得到新的判决门限  $T$ 。

$$T = \alpha \times Z = \frac{\alpha}{n-r} \sum_{i=1}^{n-r} U_i \quad (10)$$

得出 ED-CFAR 虚警率为

$$P_{fa} = \sum_{i=1}^{n-r} \frac{a_i}{c_i + \alpha} \quad (11)$$

其中

$$c_i = \frac{n-i+1}{n-r-i+1} \quad (12)$$

$$a_i = \frac{\prod_{j=i}^{n-r} c_j}{\prod_{\substack{j \neq i \\ j=i}}^{n-r} (c_j - c_i)} = \left(\frac{n}{r}\right) \binom{n-r}{i-1} (-1)^{i-1} \times \left(\frac{n-r-i+1}{r}\right)^{n-r-1} \quad (13)$$

ED-CFAR 检测概率通过将式(11)中的  $\alpha$  用  $\alpha/(1+\lambda)$  代替即可,  $\lambda$  是信号与杂噪平均功率的比值。通过式(3)判断是否存在目标。

### 3 仿真验证及结果分析

#### 3.1 软件仿真测试

为了验证本文算法的有效性, 在 Matlab 软件环境下进行仿真验证, 实验背景为均匀的高斯杂波环境, 总距离为 10 m, 每个距离单元为 5 cm, 共 200 个距离单元。待检单元左右两边的保护单元和参考单元数目分别为 2 和 12, 虚警概率  $P_{fa} = 10^{-4}$ , 目标的位置和信号幅度如表 1 所示。

表 1 目标基本信息

Table 1 Target basic information

	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4
距离单元	90	102	105	120
信号幅度/dB	40	36.5	37	36

选取不同  $P$  值、 $r$  值后的仿真结果如图 3 所示。由于 ED-CFAR 删除部分参考单元, 因此会产生一定的损失, 当参考单元总数保持不变时,  $r$  越大, 消除的子参考单元数量越多, 如果过多消除目标参考单元, 就可能丢失需要检测的目标信息, 无

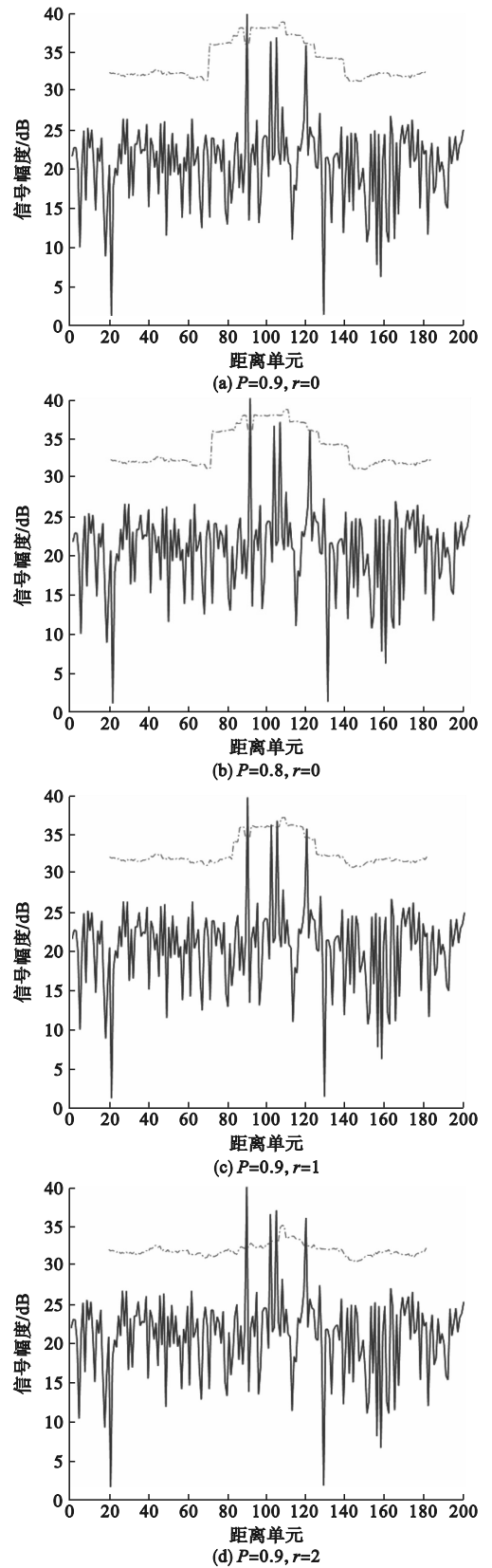


图 3 多目标情况下不同取值的 ED-CFAR 检测  
Fig. 3 ED-CFAR detection with different values under multiple targets

法进行有效的检测。在图 3 的多目标背景环境下, 图 3(c) 中当  $P = 0.9, r = 1$  时, 所有目标都可

以被检测到,ED-CFAR 参考单元的损失较小。

当其他条件相同时,单目标环境下的 CFAR 检测性能高于多目标环境下的 CFAR 检测性能。当  $r=1$ 、 $P$  不同时的 ED-CFAR 检测性能如图 4 所示,横坐标为信噪比(SNR),是信号与噪声之间的比值,用于描述信号的强度与背景噪声水平之间的关系。

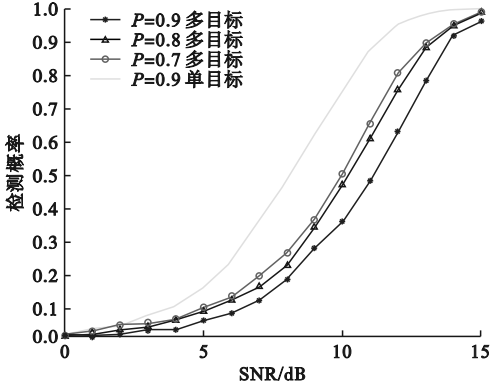


图4  $r=1$ ,  $P$  不同情况下 ED-CFAR 检测性能对比  
Fig.4 ED-CFAR detection performance under different  $P$ -values with  $r=1$

在多目标环境下,  $r=1$ 、SNR 为 10 dB,  $P=0.9$  时检测概率为 0.36,  $P=0.8$  时检测概率为 0.47,  $P=0.7$  时检测概率为 0.51。在多目标环境下,  $r$  相同时,  $P$  值越小, 检测概率越高, 目标检测性能越好。

检测概率为 0.5 时,  $P=0.9$  单目标的 SNR 损失记为 0 dB,  $P=0.9$  多目标的 SNR 损失为 2.93 dB,  $P=0.8$  多目标的 SNR 损失为 2.44 dB,  $P=0.7$  多目标的 SNR 损失为 1.97 dB。在多目标环境下,  $P$  值越小, ED-CFAR 的 SNR 损失越小, 目标检测的性能越好。

当  $P=0.9$  时, 设置  $r=1$ 、 $r=2$ 、 $r=3$ 、 $r=4$  四种情况, 此时 ED-CFAR 算法的仿真结果如图 5 所示。

在多目标环境下,  $P=0.9$ , SNR 为 10 dB,  $r=3$  时检测概率为 0.49,  $r=2$  时检测概率为 0.41,  $r=1$  时检测概率为 0.39,  $r=0$  时检测概率为 0.38。在多目标环境下,  $P$  相同时,  $r$  值越大, 剔除参考单元数量越多, 检测概率越高, 目标检测性能越好。

检测概率为 0.5 时,  $r=0$  单目标的 SNR 损失记为 0 dB,  $r=3$  多目标的 SNR 损失为 1.04 dB,  $r=2$  多目标的 SNR 损失为 1.45 dB,  $r=1$  多目标的 SNR 损失为 1.57 dB,  $r=0$  多目标的 SNR 损失为 1.69 dB。在多目标环境下,  $P$  值越小, ED-

CFAR 的 SNR 损失越小, 目标检测的性能越好。

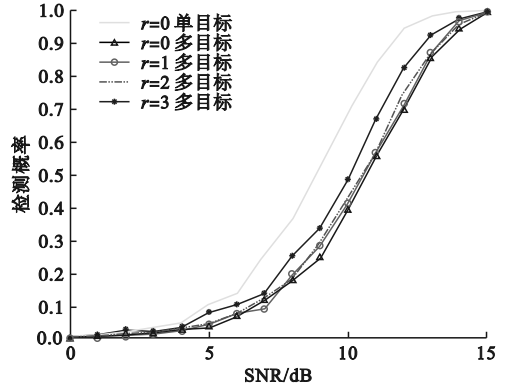


图5  $P=0.9$ ,  $r$  不同情况下 ED-CFAR 检测性能对比  
Fig.5 ED-CFAR detection performance under different  $r$ -values with  $P=0.9$

下文 3.2 中实测数据集的双目标仿真背景为均匀的高斯杂波环境, 总距离为 10 m, 每个距离单元为 5 cm, 共 200 个距离单元, 目标 1 位于雷达第 74 个距离单元, 距离雷达为 3.2 m, 目标 2 位于雷达第 82 个距离单元, 距离雷达约为 3.74 m。在上述仿真场景下对 ED-CFAR ( $P=0.8$ )、CMLD-CFAR 和 CA-CFAR 三种 CFAR 检测算法进行仿真实验, 结果如图 6 所示。

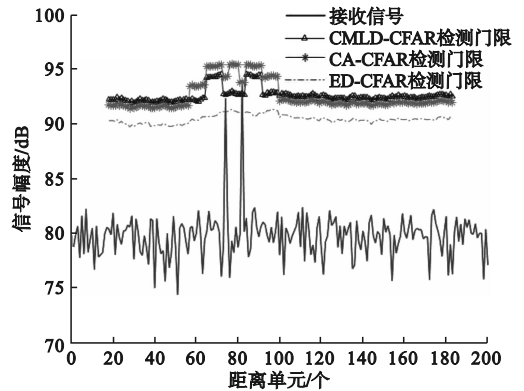


图6 多目标情况下三种 CFAR 仿真结果  
Fig.6 Three CFAR simulation results for multiple targets

图 6 中 ED-CFAR、CMLD-CFAR 和 CA-CFAR 的门限值如表 2 所示。

由图 6 和表 2 可知: 在多目标环境下, CA-CFAR 第 1 个目标提高了干扰功率的估计值, 其他目标无法被检测到, 产生目标遮蔽现象; CMLD-CFAR 能检测到的目标数量较 CA-CFAR 有明显提高; ED-CFAR 可以检测出所有目标, 能够解决在多目标环境下的目标遮蔽问题。在图 6 的多目标场景下, 三种 CFAR 的检测概率如图 7 所示。

表 2 不同 CFAR 的门限值

Table 2 Different CFAR thresholds

	目标 1	目标 2
距离单元	74	82
距离/m	3.20	3.74
信号幅度/dB	92.36	93.82
CA-CFAR/dB	94.5	94.0
CMLD-CFAR/dB	92.5	92.4
ED-CFAR/dB	90.4	90.3

在多目标环境下,当 SNR 为 10 dB 时,CA-CFAR 检测概率最低为 0.21;CMLD-CFAR 的检测概率 0.52;ED-CFAR 的检测概率为 0.6,比 CA-CFAR 检测概率提高 0.39,比 CMLD-CFAR 的检测概率提高 0.08。在多目标环境下 CA-CFAR 的检测性能最低,ED-CFAR 的目标检测性能高于 CMLD-CFAR 检测器。

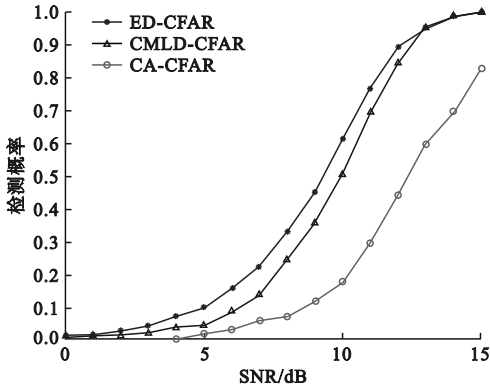


图 7 多目标情况下三种 CFAR 的检测概率

Fig.7 Detection probabilities of three kinds of CFAR for multiple targets

### 3.2 实测数据集性能测试

本文采用线性调频连续波 (FMCW) 毫米波雷达采集到的实测数据集来验证 CFAR 算法的有效性。毫米波传感器模块是基于 TI 公司的毫米波雷达 IWR6843ISK,采用 MMWAVE-STUDIO 环境和 DCA1000 实时数据捕获适配器的相关资源,便于雷达原始数据采集存储,通过 Matlab 工具对接收到的数据信息进行数字解调,进行 CFAR 算法分析。

在多目标背景下,现代雷达工作环境中的典型情况是双目标背景环境。针对仿真分析中的目标遮蔽问题,采用 TI 毫米波雷达 IWR6843ISK 的室内人员检测的数据集,该数据集采集到两个目标,目标和雷达的距离与图 6 仿真的双目标背景环境相同,如图 8 所示。目标 1 距离雷达水平位置约为 0.8 m,纵向距离约为 3.1 m,距离雷达为 3.2 m;目标 2 距离雷达水平位置约为 -1.1 m,纵

向距离约为 3.6 m,距离雷达约为 3.74 m。两个目标相距 1.9 m。

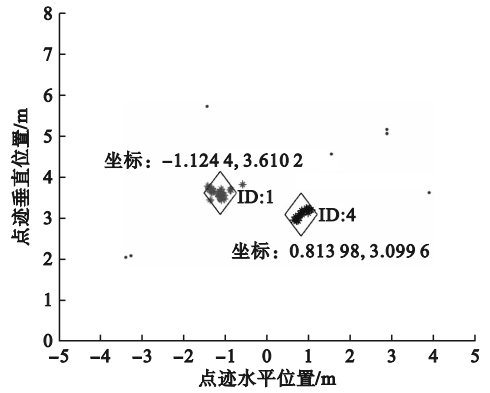


图 8 IWR6843ISK 的室内人员检测

Fig.8 Indoor person detection for IWR6843ISK

针对车载毫米波雷达目标检测过程中 CFAR 在相邻较多目标情况下发生的遮蔽现象,使用均值类 CFAR 算法、CMLD-CFAR 算法和 ED-CFAR 算法分别对数据集进行验证,设置左右两边的保护单元和参考单元数目分别为 2 和 12,虚警概率  $P_{fa} = 10^{-4}$ ,结果如图 9 所示。

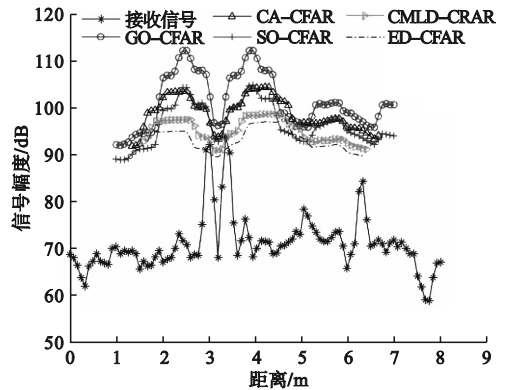


图 9 多目标场景下不同 CFAR 算法检测结果

Fig.9 Different CFAR results for multiple targets

不同 CFAR 的门限值如表 3 所示。

表 3 不同 CFAR 的门限值

Table 3 Different CFAR thresholds

	目标 1	目标 2
距离/m	3.2	3.74
信号幅度/dB	92.36	93.82
GO-CFAR/dB	102.37	102.41
SO-CFAR/dB	96.68	97.21
CA-CFAR/dB	96.68	97.21
CMLD-CFAR/dB	93.12	93.82
ED-CFAR/dB	90.40	91.32

由表 3 与表 2 可知:相同信号幅度的双目标仿真场景下的门限值误差均在 4 dB 以内;三种传统均值类恒虚警算法产生遮蔽现象,目标未被检

测到;CMLD-CFAR 可以检测到目标 2,但目标 1 未被检测到;ED-CFAR 成功检测两个目标,解决了目标遮蔽问题。在实际多目标环境下,ED-CFAR 解决目标遮蔽的效果优于传统均值类恒虚警算法和 CMLD-CFAR 算法。

## 4 结论

针对毫米波雷达采用传统 CFAR 检测算法在多目标环境下存在漏检、目标遮蔽的问题,本文提出一种在多目标环境下改进的等分别除恒虚警检测算法 ED-CFAR。通过实验分析,该算法能正确检测出多个相邻目标,有效解决了常见的 CFAR 检测器的漏检、目标遮蔽的问题,能够适用于多目标的准确检测。未来将研究 ED-CFAR 在杂波边缘环境下的检测性能。

### 参考文献 (References):

[1] WANG P Y, LIU Y L, YAO W M, et al. Improved A-star algorithm based on multivariate fusion heuristic function for autonomous driving path planning[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2023, 237(7): 1527 - 1542.

[2] TIAN X, FANG Z, ZHENG F J, et al. Continuous control of polarization state and tunable dual-channel optical communication based on highly transparent PMN-PT electro-optic ceramics[J]. Ceramics International, 2023, 49(14): 23967 - 23974.

[3] 孙柯, 吴开华, 王亚涛, 等. 基于毫米波雷达的植保无人机避障系统研究[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(6): 73 - 76.

SUN K, WU K H, WANG Y T, et al. Research on obstacle avoidance system of plant protection UAV based on millimeter wave radar[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(6): 73 - 76. (in Chinese)

[4] 杨宇恒, 宋春林. 基于步进 LFM CW 的多目标雷达检测算法[J]. 通信技术, 2016, 49(11): 1453 - 1458.

YANG Y H, SONG C L. Radar multi-target detection algorithm based on step-LFM CW[J]. Communications Technology, 2016, 49(11): 1453 - 1458. (in Chinese)

[5] KUANG C M, WANG C J, WEN B Y, et al. An improved CA-CFAR method for ship target detection in strong clutter using UHF radar[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2020, 27: 1445 - 1449.

[6] 杨威. 基于 FMCW 雷达的恒虚警检测技术研究[D]. 上海: 东华大学, 2022: 9 - 11.

[7] 杨永光, 荣锋. 一种改进的自适应恒虚警检测器[J]. 电子测量技术, 2022, 45(11): 83 - 89.

ZHANG Y G, RONG F. An improved adaptive CFAR detector[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(11): 83 - 89. (in Chinese)

[8] 秦天慈, 王中训, 黄勇, 等. 一种修正  $k$  值的 OS-CFAR 检测器[J]. 电子技术应用, 2022, 48(9): 1 - 5, 38.

QIN T C, WANG Z X, HUANG Y, et al. An OS-CFAR detector with corrected  $k$  values[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(9): 1 - 5, 38. (in Chinese)

[9] DE CARVALHO A C, LIMA C S, TORQUATO H F V, et al. Chemodiversity and anti-leukemia effect of metabolites from penicillium setosum CMLD 18[J]. Metabolites, 2022, 13(1): 23.

[10] BOUTELDJA M A, BAADECHE M, SOLTANI F. Optimization of distributed OS-CFAR and CMLD-CFAR detectors using differential evolution algorithm[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47(3): 3355 - 3365.

[11] 游英杰, 杜力, 陈颖哲, 等. TM-CFAR 的适用场景分析和实现方式对比[J]. 火控雷达技术, 2022, 51(2): 58 - 62.

YOU Y J, DU L, CHEN Y Z, et al. The proper scenario analysis and implementation comparison of TM-CFAR[J]. Fire Control Radar Technology, 2022, 51(2): 58 - 62. (in Chinese)

[12] 胡东, 毛苒晖. 基于改进型恒虚警的毫米波雷达检测算法[J]. 通信技术, 2022, 55(11): 1413 - 1418.

HU D, MAO P H. Millimeter wave radar detection algorithm based on improved CFAR[J]. Communications Technology, 2022, 55(11): 1413 - 1418. (in Chinese)

[13] 孙宾宾, 沈涛, 李洪鹏, 等. 基于 LFM CW 雷达多目标检测的 CA-CFAR 改进算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 364 - 371.

SUN B B, SHEN T, LI H P, et al. Improved CA-CFAR algorithm based on LFM CW radar multi-target detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 364 - 371. (in Chinese)

[14] 王蓓. 基于杂波图的恒虚警处理技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018: 21 - 26.

[15] 刘言, 刘宁波, 黄勇, 等. 利用相位特征筛选参考单元的改进 CFAR 方法[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2023, 36(3): 371 - 378.

LIU Y, LIU N B, HUANG Y, et al. Improved CFAR method using phase feature to select reference unit[J]. Journal of Yantai University(Natural Science and Engineering Edition), 2023, 36(3): 371 - 378. (in Chinese)

[16] DETOUCHE N, LAROUSSE T, MADJIDI H. New log-t-based CFAR detectors for a non-homogeneous Weibull Background[J]. Physical Communication, 2023, 59: 102085.

(责任编辑: 和晓军)

(上接第 21 页)

[8] 刘芳, 张峻豪, 卢熹, 等. 基于 DACO-BP 的水下聚能装药峰值超压预测[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(6): 17 - 24, 102.

LIU F, ZHANG J H, LU X, et al. Prediction of peak overpressure of underwater shaped charge based on DACO-BP neural network[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(6): 17 - 24, 102. (in Chinese)

[9] DENNIS ADAM A, PANNELL JORDAN J, SMYLL DANNY J, et al. Prediction of blast loading in an internal environment using artificial neural networks[J]. International Journal of Protective Structures, 2021, 12(3): 287 - 314.

[10] HINTON G E, SALAKHUTDINOV R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. Science, 2006, 313(5786): 504 - 507.

[11] 马坤, 王长利, 李名锐, 等. 聚能战斗部水下爆炸载荷特性[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(1): 1 - 5.

MA K, WANG C L, LI M R, et al. Underwater explosion load characteristic of shaped charge warhead[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42(1): 1 - 5. (in Chinese)

[12] FERREIRA C. Gene expression programming: mathematical modeling by an artificial intelligence[M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2006.

(责任编辑: 宋颖韬)