

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208893

## 一种改进的自适应恒虚警检测器\*

张永光<sup>1,2</sup> 荣锋<sup>1,2</sup>

(1.天津工业大学电子与信息工程学院 天津 300387; 2.天津市光电检测技术与系统重点实验室 天津 300387)

**摘要:**为了解决传统自适应恒虚警检测器在多目标环境下检测性能下降的问题,对传统基于指数变换的恒虚警检测器(VI-CFAR)的选择策略进行改进,提出了一种改进的自适应恒虚警检测器-VIHCES-CFAR。在杂波边缘环境下和多目标干扰环境下分别选择非均匀杂波估计恒虚警检测器(HCE-CFAR)和交互式恒虚警检测器(S-CFAR)进行处理,提高了多目标环境下的目标检测能力,有效避免了目标遮蔽的问题。实验结果表明,在检测概率为0.5的条件下VIHCES-CFAR的信噪比相对于SVI-CFAR低0.05 dB,在多目标环境下检测概率为99.78%,在杂波边缘环境下检测概率控制在 $10^{-4}$ 左右,具有稳定的抗干扰能力和良好的虚警控制能力。并通过实测数据验证了VIHCES-CFAR检测器在解决目标遮蔽问题上的有效性。

**关键词:**雷达目标检测;多目标环境;恒虚警处理;自适应检测;AWR1642

**中图分类号:** TN957.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

## An improved adaptive CFAR detector

Zhang Yongguang<sup>1,2</sup> Rong Feng<sup>1,2</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and System, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of decreasing detection performance of traditional adaptive constant false alarm detector (CFAR) in multi-target environment, the selection strategy of traditional exponential transform-based CFAR (VI-CFAR) is improved. An improved adaptive constant false alarm detector VIHCES-CFAR is proposed. Heterogeneous Clutter Estimating CFAR (HCE-CFAR) and Switching CFAR (S-CFAR) are selected in Clutter edge environment and multi-object interference environment respectively, which improves the ability of target detection in multi-target environment and effectively avoids the problem of target masking. Experimental results show that the SNR of VIHCES-CFAR is 0.05 dB lower than that of SVI-CFAR at the detection probability of 0.5, and the detection probability of VIHCES-CFAR is 99.78% in the multi-target environment, and the detection probability of VIHCES-CFAR is about  $10^{-4}$  in the clutter edge environment. It has stable anti-interference ability and good false alarm control ability. The effectiveness of VIHCES-CFAR detector in solving the problem of target masking is verified by the measured data.

**Keywords:** radar target detection; multi-target environment; constant false alarm processing; adaptive detection; AWR1642

## 0 引言

恒虚警(constant false alarm rate, CFAR)检测<sup>[1]</sup>也被称为“自适应门限检测”,如今已经广泛应用于雷达系统设计。在经典的CFAR检测器中,单元平均恒虚警(cell averaging CFAR, CA-CFAR)检测器<sup>[2]</sup>最先被提出,该检测器在均匀杂波环境下能够保持良好的检测性能,但在有干扰目标的杂波环境下检测性能将会严重下降<sup>[3-5]</sup>。单元平

均选大恒虚警(greatest of CFAR, GO-CFAR)检测器<sup>[6]</sup>能够很好的应对杂波边缘情况,但对于多目标干扰下的杂波环境,该检测器会出现检测性能下降的现象。针对GO-CFAR存在的问题, Finn提出了非均匀杂波估计CFAR(heterogeneous clutter estimation CFAR, HCE-CFAR)检测器<sup>[7]</sup>, HCE-CFAR采用似然估计和多假设检验得到杂波边缘位置的方式可以很好的适应杂波边缘环境,但其无法判断滑窗是否处于均匀环境。而单元平均选小恒虚警检测

收稿日期:2022-01-20

\* 基金项目:天津市科委青年基金(15JCQNJC42100)、天津市科技特派员项目(16JCTPJC48100, 16JCTPJC47200)资助

器 (smallest of CFAR, SO-CFAR)<sup>[8]</sup> 和有序统计恒虚警检测器 (order statistics CFAR, OS-CFAR)<sup>[9-10]</sup> 能够在多目标环境下表现出较好的检测性能, 但是其虚警控制能力较差。总的来说, 以上几种检测器只能适应特定的环境, 而真实的环境是复杂多变的。因此刘佳等提出了一种基于指数变换的恒虚警检测器 (variability index CFAR, VI-CFAR)<sup>[11]</sup>, 该检测器结合了 CA-CFAR、GO-CFAR 以及 SO-CFAR 等检测器的优点, 通过判断待检测单元所处的杂波背景环境选取合适的 CFAR 检测器进行恒虚警处理, VI-CFAR 检测器能够很好的适应均匀环境和杂波边缘环境, 但是当检测器的前后参考窗均出现干扰目标时, VI-CFAR 的检测性能会受到极大的影响。Li 等提出了交互式变化指数 CFAR (SVI-CFAR)<sup>[12]</sup>, 其融合交互式 CFAR (Switching CFAR, S-CFAR)<sup>[13-14]</sup> 和 VI-CFAR, 能够在两侧参考窗都有干扰目标时表现出优良的检测性能, 但是当参考窗的一侧有干扰目标时, 由于其中一侧参考窗采用 CA-CFAR 而导致检测性能下降。芮义斌等提出了一种针对非均匀环境下的多策略 CFAR (MS-CFAR) 检测器<sup>[15]</sup>, 该检测器能够很好的适应多目标干扰环境。然而, MS-CFAR 在杂波边缘背景的控制能力有待提高。

针对上述检测器在杂波边缘和多目标干扰等非均匀杂波背景下存在的问题, 提出了一种改进的自适应恒虚警检测器 (VIHCES-CFAR), 该检测器融合了 SVI-CFAR 检测器和 HCE-CFAR 检测器的优点, 在相同检测概率条件下信噪比低于 SVI-CFAR, 在多目标环境下具有更为稳定的抗干扰能力, 在杂波边缘环境下其虚警控制能力相比 MS-CFAR 有较大的提升。通过蒙特卡洛仿真和实测数据验证了 VIHCES-CFAR 检测器具有稳定的抗干扰能力和良好的虚警控制能力, 可有效解决多目标环境下目标遮蔽的问题。

### 1 VI-CFAR 检测器与改进检测器

VI-CFAR 检测器的原理如图 1 所示。首先通过待检测单元周围的参考单元计算出检测器前后参考窗的方差统计量 VI 和均值统计量 MR, 通过比较二者的值来确定目标所处的环境类型, 进而选取适应该环境的 CFAR 策略进行恒虚警处理。

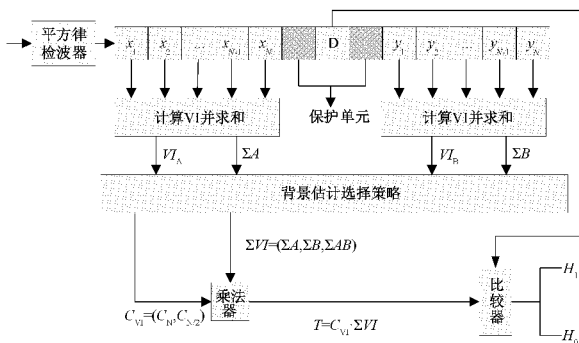


图 1 VI-CFAR 原理框图

如图 1 所示, D 表示待检测单元, 待检测单元两侧的阴影部分为保护单元。  $x_i (i = 1, \dots, N)$  代表检测器的前参考窗部分,  $y_i (i = 1, \dots, N)$  代表检测器的后参考窗部分。  $C_{vi}$  表示门限系数,  $N$  表示待检测单元前后参考单元的数目, 参考单元总数为  $2N$ 。  $VI_A$  和  $VI_B$  分别表示检测器前后参考窗的二阶统计量, 通过它们可以判断待检测单元两侧参考窗是否均匀。  $\Sigma A$  和  $\Sigma B$  分别代表待前后参考窗的背景杂波功率,  $\Sigma VI$  代表总的背景杂波功率的估算值。  $T$  表示检测器最终的检测门限, 用于判断是否有目标存在。

二阶统计量 VI 用来判断检测器的前后参考窗的背景杂波环境是否均匀, 其表达式如式(1)所示。

$$VI = 1 + \frac{\hat{\delta}^2}{\hat{\mu}^2} = 1 + \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^2}{(\bar{x})^2} \quad (1)$$

式中:  $\hat{\delta}^2$  表示方差的估算值;  $\hat{\mu}^2$  表示均值的估算值;  $x$  表示总参考单元  $2N$  的平均值。

统计量 MR 用来判断检测器前后参考单元的统计均值是否相等, 其表达式如式(2)所示。

$$MR = \bar{x}_A / \bar{x}_B = \sum_{i \in A} x_i / \sum_{i \in B} x_i \quad (2)$$

式中:  $\bar{x}_A$  表示检测器前参考窗的样本均值;  $\bar{x}_B$  表示检测器后参考窗的样本均值。

检测器背景杂波类型的判断方式如式(3)和(4)所示。

$$\begin{cases} VI \leq K_{vi} \Rightarrow \text{均匀杂波} \\ VI > K_{vi} \Rightarrow \text{非均匀杂波} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} K_{MR}^{-1} \leq MR \leq K_{MR} \Rightarrow \text{均值相同} \\ MR < K_{MR}^{-1} \text{ 或 } MR > K_{MR} \Rightarrow \text{均值不同} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $K_{vi}$  表示检测器统计的比较门限值,  $K_{MR}$  表示检测器统计量 MR 的比较门限值。通过式(3)和式(4)可以判断出前后参考窗是否均匀以及它们的均值是否相同, 然后 VI-CFAR 检测算法选取 CA-CFAR、SO-CFAR、GO-CFAR 中合适的 CFAR 检测器进行恒虚警处理。当参考窗中存在均匀杂波时, VI-CFAR 检测器将选取 CA-CFAR 进行恒虚警处理。而 GO-CFAR 和 SO-CFAR 分别作为杂波边缘和待检测单元两侧有干扰目标的场景。具体的选择策略如表 1 所示。

表 1 VI-CFAR 算法选择策略

VI <sub>A</sub> 是否均匀	VI <sub>B</sub> 是否均匀	MR	背景环境	策略选择
是	是	是	均匀环境	CA-CFAR
是	是	否	杂波边缘	GO-CFAR
否	是	/	前窗目标干扰	CA-CFAR
是	否	/	后窗目标干扰	CA-CFAR
否	否	/	前/后窗目标干扰	SO-CFAR

SVI-CFAR 检测器的改进思路为: 当 CFAR 检测器两侧的参考窗同时出现干扰目标时, 该检测器选择 S-CFAR

策略来替代 SO-CFAR 策略。S-CFAR 检测器可将参考单元划分为两个集合,从而更好的从均匀杂波单元中分离出干扰目标。在均匀杂波背景下,S-CFAR 具有优良的检测性能,同时,在非均匀环境下,S-CFAR 具有较强的稳健性,能够有效提高恒虚警检测器在多目标干扰环境下的检测性能。

MS-CFAR 检测器的改进思路为:对于杂波边缘与前后参考窗均值不同这两种场景,AC-CFAR 将作为 MS-CFAR 的检测策略。AC-CFAR 检测器<sup>[16]</sup>是根据 CA-CFAR 改进的,该方法选择与被检测单元采样最接近的背景杂波估计值作为最终的杂波功率,最终的检测门限的检测门限由杂波功率和标称化因子的乘积得到。MS-CFAR 检测器的检测损失远远低于 GO-CFAR 检测器,且能够很好的适应杂波边缘和多目标干扰环境。当检测环境为多目标干扰环境时,MS-CFAR 将使用 S-CFAR 检测策略,以改善恒虚警检测器在非均匀环境下的检测性能,降低检测损失。

由以上两种改进算法的分析可知,当检测器的一侧存在干扰目标时,SVI-CFAR 和 M-CFAR 分别选取 CA-CFAR 和 S-CFAR 进行恒虚警处理。由于 CA-CFAR 在多目标干扰环境下检测性能下降,S-CFAR 在杂波边缘处的控制能力不足,因此,本文提出新的改进检测算法来解决上述两种检测器存在的问题。

## 2 VIHCES-CFAR 检测器

VIHCES-CFAR 检测器由 CA-CFAR、HCE-CFAR 和 S-CFAR 4 种恒虚警选择策略组成,根据检测环境的差异自动的选取合适的检测策略进行恒虚警处理。该算法的优势在于当一侧参考窗均匀而另一侧非均匀情况下,采用 HCE-CFAR 策略进行恒虚警处理,从而使更多与待检测单元背景一致的参考单元数据进行背景估值,进而判断出整个参考窗中背景不一致的分离点,使检测更为精确。对于多目标干扰环境,VIHCES-CFAR 检测器会选取 S-CFAR 策略进行恒虚警处理。VIHCES-CFAR 检测器的选择策略如表 2 所示。

表 2 VIHCES-CFAR 检测器选择策略

$VI_A$	$VI_B$	均值	背景环境	策略选择
是否均匀	是否均匀	是否相同		
是	是	是	均匀环境	CA-CFAR
是	是	否	杂波边缘	HCE-CFAR
否	是	/	前窗目标干扰	HCE-CFAR
是	否	/	后窗目标干扰	HCE-CFAR
否	否	/	前/后窗目标干扰	S-CFAR

从 VIHCES-CFAR 检测器的选择策略可以看出,均匀环境下,VIHCES-CFAR 检测器选取 CA-CFAR 策略。在

单侧参考窗有干扰目标时,VIHCES-CFAR 检测器选取 HCE-CFAR 策略。在杂波边缘环境下,HCE-CFAR 能够确定杂波边缘的位置,进而判断待检测单元所在的杂波区域,从而更准确的对目标进行检测,即 HCE-CFAR 能够更好的适应杂波边缘的场景。因此 VIHCES-CFAR 检测器选取 HCE-CFAR 策略。S-CFAR 在多目标干扰环境下能够保持稳定的检测性能,因此,当参考窗的两侧均存在干扰目标时 VIHCES-CFAR 检测器选取 S-CFAR 策略,从而更好的保持在多目标环境下表的检测性能。

为了更好的说明 VIHCES-CFAR 检测器相对其他同类型检测器在不同环境下的优势,接下来将对 VIHCES-CFAR 与其他检测器的性能进行比较,如表 3 所示。

表 3 VIHCES-CFAR 与 VI 类算法的比较

$VI_A$	$VI_B$	均值	SVI-CFAR	MS-CFAR	VIHCES-CFAR
是否均匀	是否均匀	是否相同			
是	是	是	CA	CA	CA
是	是	否	GO	AC	HCE
否	是	/	CA	S	HCE
是	否	/	CA	S	HCE
否	否	/	S	S	S

由表 3 可知,均匀环境下,由于 3 种检测器采用的均是 CA-CFAR,因此三种检测器在均匀环境下都能保持良好的检测性能。当待检测单元两侧同时出现干扰目标时,VI-CFAR 检测器选取均值类 CFAR 检测器中的 SO-CFAR 检测器,这样会导致背景杂波功率估计值过高而出现漏警,从而使 VI-CFAR 的检测性能开始下降。VIHCES-CFAR 检测器在多目标干扰场景下选取抗干扰目标能力更强的 S-CFAR 检测器代替 SO-CFAR 检测器,从而使 VIHCES-CFAR 检测器更适应多目标环境。此外,当检测器的前后参考窗均匀但不相等时,即存在杂波边缘环境的情况下,VIHCES-CFAR 检测器会自动选取在杂波边缘环境检测性能较强的 HCE-CFAR 检测器来代替 CA-CFAR 检测器从而提高检测性能。

## 3 仿真分析

为了验证 VIHCES-CFAR 检测性能的优势,

采用蒙特卡洛方法<sup>[17]</sup>对各 CFAR 检测器的检测性能进行仿真实验,本次实验的仿真次数为  $10^4$  次,设置参考窗的长度为 36,虚警概率设置为  $P_{fa} = 1 \times 10^{-4}$ ,设置背景功率为 20 dB,设置 S-CFAR 的参数  $\alpha = 0.4$ ,统计量的比较门限值  $K_{VI} = 4.76, K_{MR} = 1.086$ 。

### 3.1 均匀环境下检测性能分析

在均匀杂波背景下几种 CFAR 检测器的检测性能仿真对比如图 2 所示。从图 2 的仿真结果可知,从上到下的

曲线分别是 CA-CFAR、VIHCES-CFAR、VI-CFAR、MS-CFAR、GO-CFAR、SVI-CFAR、SO-CFAR 的检测概率曲线。实验结果表明:在均匀环境下,CA-CFAR 检测器的检测性能最好,VIHCES-CFAR 检测器的检测性能与 VI-CFAR 最接近。

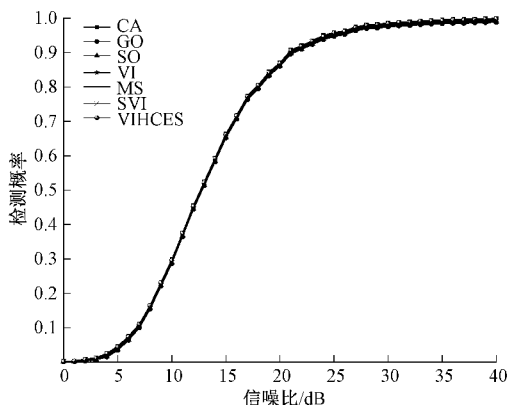


图 2 均匀环境下的检测性能

为了进一步分析各检测器在均匀环境下的检测性能,选取了检测概率  $P_d=0.5$  时各个检测器的信噪比(SNR/dB),具体实验仿真数据如表 4 所示。由表 4 可以看出,当检测概率  $P_d=0.5$  时,VIHCES 所需的 SNR 比 SVI 少 0.05 dB,比 VI-CFAR 少 0.02 dB。相对于 CA-CFAR 信噪比的损失为 0.03 dB,而 VIS 相对 CA-CFAR 的信噪比损失为 0.08 dB,说明文中提出的 VIHCES-CFAR 算法在均匀环境中能够保持较少的信噪比损失,检测性能维持在与 CA-CFAR 接近的水平。

表 4 相同检测概率下各检测器的信噪比对比

$P_d=0.5$	CA	GO	SO	MS	VI	SVI	VIHCES
SNR/dB	12.65	12.73	12.76	12.82	12.70	12.73	12.68

### 3.2 多目标干扰环境下检测性能分析

为了更好的验证各检测器在多目标环境下的检测性能,分别设计了待检测单元单侧有干扰目标和双侧同时有干扰目标的两种仿真实验场景。其中,单侧以前参考窗为例。

当检测器前参考窗有一个干扰目标时,其检测性能的仿真结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,CA-CFAR 检测器和 GO-CFAR 检测器的检测性能有一定程度的下降,信噪比为 40 时,检测概率分别为 72.15% 和 59.29%。因为前参考窗有一个干扰目标时,前参考窗被认为是不均匀的,此时 SVI-CFAR 和 MS-CFAR 检测器在后参考窗一侧分别选择 CA-CFAR 和 AC-CFAR 进行恒虚警处理,而 VIHCES-CFAR 则选取 HCE-CFAR 算法进行恒虚警处理,都能够在单侧有干扰目标的场景下保持优良的检测性能。

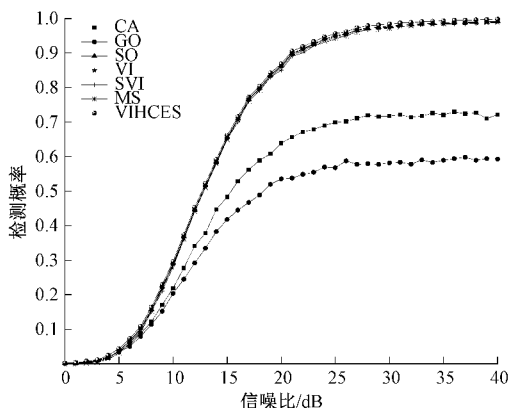


图 3 前参考窗存在 1 个干扰时的检测性能

CFAR 检测器在前参考窗有 2 个干扰目标时的检测性能仿真结果如图 4 所示。由图 4 可以看到,CA-CFAR 检测器和 GO-CFAR 检测器的检测性能进一步下降,信噪比为 40 时,检测概率分别为 72.15% 和 59.29%。VI-CFAR 相比 VIHCES-CFAR 检测性能在低信噪比时略有下降,因为随着前参考窗干扰目标的增多,VI-CFAR 在选择后参考窗进行 CA-CFAR 进行处理时会受到前参考窗的影响,进而导致有虚警现象出现,使得检测性能下降。

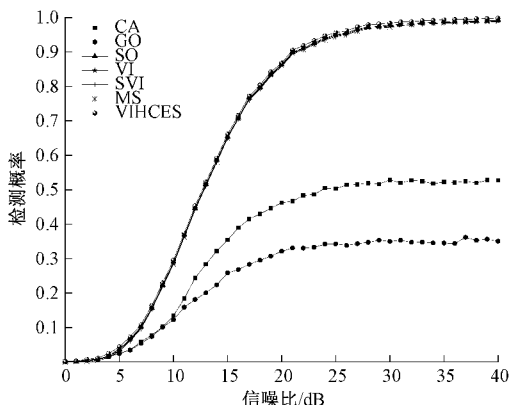


图 4 前参考窗存在 2 个干扰时的检测性能

图 5 是当检测器的前后参考窗各有 1 个干扰目标时的检测性能仿真结果。可以看到,VI-CFAR 的检测性能下降严重,信噪比为 40 dB 时的检测概率为 71.03%。这是因为在非均匀环境中,VI-CFAR 选取均值类 CFAR 检测器中的 SO-CFAR 检测器进而导致背景杂波功率估计值过高,从而使检测性能下降。信噪比为 40 dB,SVI-CFAR 的检测概率为 93.08%,而 VIHCES-CFAR 在非均匀环境下选取检测性能较强的 S-CFAR 检测器代替 SO-CFAR 检测器,在信噪比为 40 dB 时的检测概率为 99.78%。说明 VIHCES-CFAR 检测器能够提高目标检测概率,减少目标遮蔽现象。

### 3.3 杂波边缘环境下检测性能分析

在杂波边缘环境下,参考窗内的杂波功率将发生阶跃。

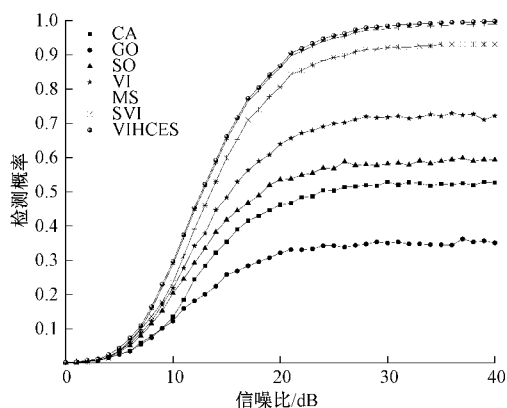


图 5 前后参考窗均存在 1 个干扰时的检测性能

不同位置参考单元的杂波功率水平不相同。虚警概率  $P_{fa}=10^{-4}$  时,各 CFAR 检测器的虚警控制能力仿真如图 6 所示。

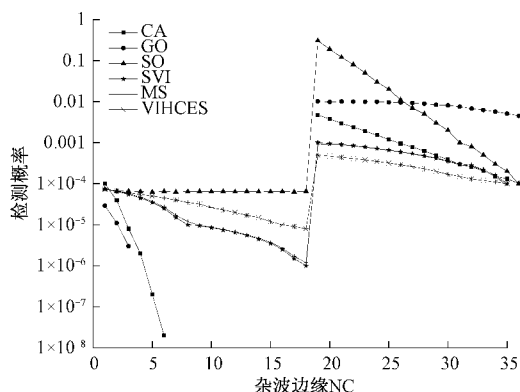


图 6 不同杂波边缘位置的虚警概率

由图 6 可以看出,VIHCES-CFAR 检测器的虚警概率基本控制在  $10^{-4}$  左右,其虚警控制能力优于其它恒虚警检测器。这因为在杂波边缘环境下,MS-CFAR 和 SVI-CFAR 自动选取 AC-CFAR 和 GO-CFAR 策略进行恒虚警处理,而 VIHCES-CFAR 则自动选取更适应杂波边缘环境的 HCE-CFAR 检测策略进行恒虚警处理。

#### 4 VIHCES-CFAR 检测器的实验验证

本节使用雷达实测数据验证 VIHCES-CFAR 在实际工作环境中的检测性能。本实验雷达系统主控芯片采用 TI 公司的 AWR1642。AWR1642 芯片工作频率为 76~81 GHz,带宽为 4 GHz,具有 2 个发射天线和 4 个接收天线,发射信号采用锯齿波,调制方式为调频连续波<sup>[18]</sup> (frequency modulated continuous wave, FMCW)。芯片内部集成了 DSP 子系统和 ARM 子系统,DSP 子系统 C674X DSP 用于处理雷达信号,ARM 子系统 ARM Cortex-R4F 用于控制雷达数据的传输。AWR1642 雷达模块如图 7 所示。

测试目标为两个角反射器和一个测试人员,实验中,角

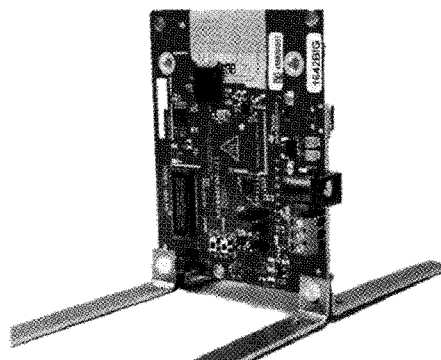


图 7 AWR1642 雷达模块

反射器由于接收到发射信号后自身经过多次反射能够反射回较强的信号,因此作为强反射目标,人相对角发射器作为弱反射目标。除有效目标外,实测场景中还存在树木等干扰目标,实验场景如图 8 所示。



图 8 实验场景

如图 9 为实测数据的目标检测结果,该结果是由实验场景中的一部分原始数据经过 MATLAB 处理得到的。图中出现了 3 个比较明显的峰值,坐标为 (2.801, 0, 152.3)、(5.034, 0, 157.5) 和 (8.58, 0.968 5, 110),分别对应测试设备前方的两个角反射器和一个运动的测试人员。两个角反射器距离雷达的径向距离分别为 2.801 和 5.034 m,测试人员距离雷达的径向距离为 8.58 m,速度均为 0.968 5 m/s。此外还包括一些杂波信号。

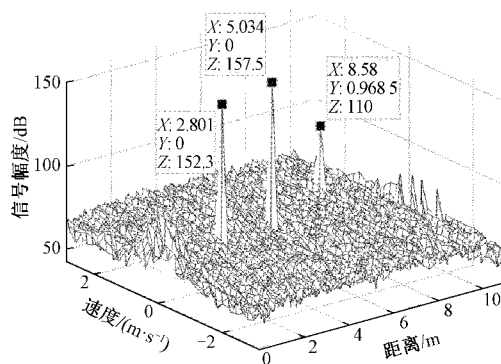


图 9 实测数据的目标检测结果

文献[15]提出的 MS-CFAR 检测器对实测数据的恒虚警处理结果如图 10 所示。从处理结果可以看出,只出现了坐标为(2.801,0,152.3)和(5.034,0,157.5)的两个峰值信息,即经过 MS-CFAR 算法处理后只检测到了两个有效目标(强反射目标),而测试人员(弱反射目标)未被检测到,说明出现了目标遮蔽现象。

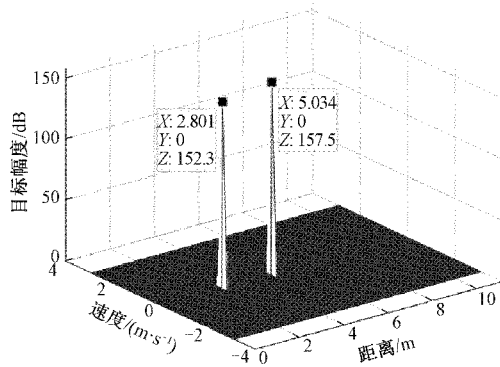


图 10 MS-CFAR 处理后的结果

本文提出的 VIHCES-CFAR 检测器对实测数据的恒虚警处理结果如图 11 所示。从处理结果可以看出,出现了坐标为(2.801,0,152.3)、(5.034,0,157.5)和(8.58,0.968 5,110)的 3 个峰值,即经过 VIHCES-CFAR 检测器处理后检测到了两个有效目标(强反射目标),测试人员(弱反射目标)均能够被检测到。说明本文提出的 VIHCES-CFAR 检测器能够很好的避免目标遮蔽问题。

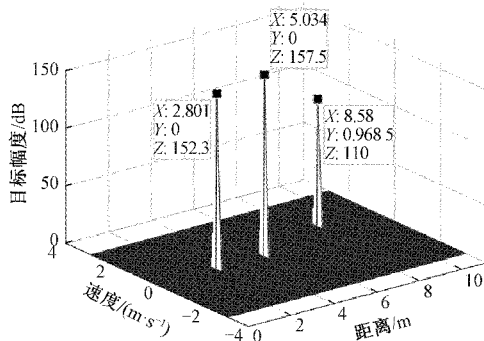


图 11 VIHCES-CFAR 处理后的结果

## 5 结 论

本文提出了一种基于 VI-CFAR 检测器改进的恒虚警检测器(VIHCES-CFAR)。该检测器结合了 SVI 恒虚警算法和 HCE-CFAR 恒虚警算法的优点,在被检测单元单侧和双侧有干扰目标的情况下,选用 HCE-CFAR 恒虚警算法代替 CA-CFAR 恒虚警算法,同时在多目标环境下,选用 S-CFAR 恒虚警算法代替 SO-CFAR 恒虚警算法。解决了传统自适应恒虚警算法在复杂环境下检测性能下降的问题。实验结果表明:在均匀环境下,VIHCES-CFAR 检测器能够保持良好的检测性能,相同检测概率下其信噪比

别比 SVI-CFAR 和 MS-CFAR 低 0.05 和 0.02 dB;在多目标干扰环境下,VIHCES-CFAR 检测器的检测性能优于 SVI-CFAR 检测器,在信噪比为 40 dB 时的检测概率为 99.78%;在杂波边缘环境下,VIHCES-CFAR 检测器的虚警概率控制在  $10^{-4}$  左右。并通过仿真实验和雷达实测数据验证了 VIHCES-CFAR 检测器具有稳定的抗干扰能力和良好的虚警控制能力,可有效解决多目标环境下目标遮蔽的问题。

## 参 考 文 献

- [1] 张养瑞,高梅国,李云杰. LFM 脉冲雷达恒虚警检测的协同压制干扰[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(11): 2156-2163.
- [2] KUANG C, WANG C, WEN B, 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.
- [3] 吴筑莉,熊鑫,余国文,等. 基于 CA-CFAR 检测下多假目标的压制干扰门限[J]. 电子信息对抗技术, 2018, 33(1): 49-53.
- [4] 文翔,万健中,张海燕,等. 基于 OSVI-CFAR 改进的恒虚警检测器[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(1): 181-187.
- [5] BAADECHE M, SOLTANI F. Performance comparison of some CFAR detectors in homogenous and non-homogenous clutter[C]. IEEE International Conference on Signal & Image Processing Applications, Melaka, Malaysia, 2013: 101-105.
- [6] AKHTAR J, OLSEN K E. GO-CFAR trained neural network target detectors[C]. IEEE Radar Conference (RadarConf19), IEEE, 2019, DOI: 10.1109/RADAR.2019.8835765.
- [7] 张仁李,盛卫星,马晓峰. 基于最大似然差的智能恒虚警检测器[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(12): 2631-2637.
- [8] SHUPING L U, DING F, RANWEI L I, et al. Robust centralized CFAR detection for multistatic sonar systems[J]. Chinese Journal of Electronics, 2021, 30(2): 322-330.
- [9] 柳向,李东生,刘庆林. 基于 OS-CFAR 的 LFM 脉压雷达多假目标干扰分析[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(7): 1486-1492.
- [10] 刘中祥,宋志勇,付强. 基于 FPGA 的二维 OS-CFAR 设计与实现[J]. 全球定位系统, 2015, 40(5): 76-80.
- [11] 刘佳,肖鹏斌,袁有宏. 基于自适应阈值选择的分布式多策略 CFAR 检测算法[J]. 电光与控制, 2020, 27(9): 60-65.
- [12] LI Y, JI Z, LI B, et al. Switching variability index based multiple strategy CFAR detector[J]. Journal of

- Systems Engineering and Electronics, 2014, 25(4): 580-587.
- [13] 王陆林, 刘贵如, 邹姗, 等. 非均匀噪声环境下分布式 IVI-CFAR 检测算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2019, 31(4): 509-516.
- [14] HAN D J, TAN X M, SHI P Y. A SOS-CFAR detector based on test cell statistics [J]. Electronic Design Engineering, 2019, 27(2): 29-33.
- [15] 芮义斌, 魏知寒, NGUYEN K, 等. 一种非均匀背景下的多策略 CFAR 检测器[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2016, 40(2): 199-203.
- [16] 吉书, 龙袁昌, 杨丽春, 等. 一种改进的恒虚警率 SAR 图像舰船检测算法[J]. 现代雷达, 2012, 34(8): 29-32.
- [17] 葛秀杰, 高雅, 李德兴, 等. 等温滴定量热仪的校准方法与程序实现[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2):1-9.
- [18] 胡继志, 张丕状, 杨大鹏. 便携式 FMCW 雷达动目标探测设计[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(12): 90-94.

#### 作者简介

张永光, 硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理。

E-mail:1532436313@qq.com

荣锋, 博士, 副教授, 主要研究方向为无损检测、信号处理和故障检测等。