

文章编号: 1007 4619(2006) 03 0345 05

一种 UW BSAR 图像中的非均匀背景 CFAR 检测方法

方学立^{1,2}, 梁甸农¹, 王红岗¹, 黄晓涛¹

(1 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073 2 空军装备研究院 装备总体论证研究所, 北京 100076)

摘 要: 针对 UW BSAR 图像中的非均匀背景目标检测问题, 提出了一种 CFAR 检测方法。该方法运用变量索引和秩序统计量 CFAR 检测, 可以在杂波背景的非均匀区域, 自动根据检测单元的位置选择合适的估计杂波功率的样本, 能使检测器在多目标环境和不规则非均匀背景交界处保持 CFAR 性能。试验结果表明, 该方法在 UW BSAR 非均匀背景中的目标检测性能, 优于传统的单元平均 CFAR 检测算法。

关键词: UW BSAR; CFAR; 非均匀背景; 变量索引

中图分类号: TP391. 41 **文献标识码:** A

A CFAR Detection Method for Nonhomogeneous Environment in UW BSAR Image

FANG Xue-li^{1,2}, LIANG Dian-nong¹, WANG Hong-gang¹, HUANG Xiao-tao¹

(1 School of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Hunan Changsha 410073, China;
2 The Research Institute on General Development and Evaluation of Equipment EAAE of PLA, Beijing 100076, China)

Abstract A CFAR target detection method is proposed for nonhomogeneous environment in UW BSAR image with variability index and order statistics CFAR detection. The method can select appropriate cells in non-homogenous regions for clutter environment power estimation. The designed detector can keep CFAR performance in multi targets environment and irregular boundary of non-homogenous regions. Experimental results show that the novel method can offer better detection performance than traditional cell average CFAR detection methods.

Key words UW BSAR; CFAR; nonhomogeneous environment; variability index

1 引 言

超宽带合成孔径雷达 (Ultra Wide Band Synthetic Aperture Radar 即 UW BSAR) 能够穿透叶簇等植被覆盖, 探测隐蔽于其中的目标并进行高分辨成像, 在军用领域和民用领域都具有重要价值。UW BSAR 多工作于低频段, 电磁波的穿透特性使得 UW BSAR 图像中的杂波特性与普通 SAR 不同, 相应的目标检测方法也是不同的, 因此研究 UW BSAR 图

像中的目标检测方法是一项有意义的工作。

UW BSAR 图像中不同植被覆盖区域的杂波具有不同的统计模型, 若 UW BSAR 的工作场景中包含多种植被覆盖类型, 则在一幅 UW BSAR 图像中就包含了多块具有不同统计模型的杂波。在每一块特定统计模型的杂波图像中, 借助杂波识别方法, 运用单元平均 CFAR (Cell Average CFAR, 即 CA-CFAR) 方法就可以获得良好的检测性能^[1]。在两块具有不同统计模型杂波的交界处, 杂波呈现非均匀特性, 这时 CA-CFAR 算法的性能会严重下降。

收稿日期: 2005 02 03 修订日期: 2005 04 22
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60402034); “十五”国防预研资助项目 (41307020203)。
作者简介: 方学立 (1976—), 男, 博士, 工程师, 主要从事雷达系统, 雷达目标检测和雷达杂波仿真、分析与建模方面的研究工作, 已发表文章 20 多篇。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Smith和 Varshney提出的智能索引变量 CFAR (Variability Index CFAR, 即 VICFAR)检测方法^[2],能够在均匀和非均匀杂波背景中使检测器保持 CFAR 检测性能。文献 [3] 基于 VICFAR 提出了区域分类 CFAR算法 (Region Classification CFAR, 即 RC-CFAR) 用于 SAR图像中的目标检测,该方法在非均匀背景中具有较好的智能 CFAR 检测效果。但 RC-CFAR 检测器把参考单元分为上下左右四个区域,导致每个区域包含的数据样本过少,对于非均匀性判断的鲁棒性会变差。文献 [4] 将 VICFAR 方法用于 UWBSAR 图像中非均匀背景目标检测,它先将检测窗口根据一定准则分成上下或左右两个部分,然后采用类似一维 VICFAR 方法进行目标检测,取得了较好的结果。在一维情况下, VICFAR 方法通过变量索引,能够根据检测单元在杂波边缘的位置自适应选用 CA、最大选择 (Greatest Of 即 GO) 和最小选择 (Smallest Of 即 SO) 等 CFAR 检测技术,使得无论在均匀杂波区域还是在非均匀杂波区域,都能够获得良好的 CFAR 检测结果。在 SAR 图像中,由于杂波边缘的不规则,使得进行前后沿窗口划分时无法彻底将两块不同区域杂波分开,这时均值 (Mean Level 即 ML) 类的 CA、GO 和 SO 等 CFAR 检测器在估计相应的杂波背景功率时都会出现较大的偏差,在多目标场合情况下,偏差会更大。本文将在文献 [2] 和 [4] 的基础上,提出用 OS CFAR 检测器结合 VICFAR 检测方法来实现 UWBSAR 图像中非均匀背景中的目标检测。

2 算法描述

2.1 算法流程

为便于表述,先给出本文所设计的检测算法流程图 (图 1)。

在 UWBSAR 图像中,往往既包含非均匀背景,也包含均匀背景,检测器必须根据检测背景是否均匀而采用不同的检测策略,因此在实际检测中应当根据检测参考单元的杂波是否均匀来选择一种合适的检测策略,这就需要事先判断参考单元中杂波的均匀性。文献 [2] 中给出的 VICFAR 检测器,通过计算进入参考单元的变量索引和均值比来判断当前检测背景的均匀性,并由此来选择相应的 CFAR 检测策略。

文献 [2] 的算法流程与图 1 类似,所不同的是,它采用 ML 类统计量计算方法,且是针对一维雷达距离向目标检测而设计的。本文研究 UWBSAR 图像中非均匀背景目标检测,检测窗口不是一条距离向,而是

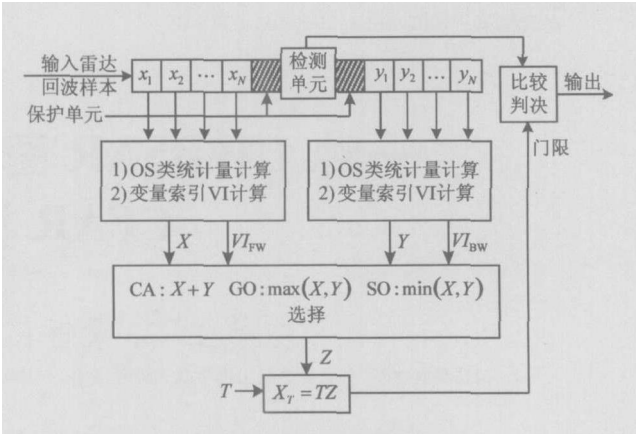


图 1 检测器的流程图

Fig 1 The flow chart of the detector

一个二维窗口,这就需要采用合适的方法将二维检测窗口划分为前沿窗口和后沿窗口。由于对窗口的划分总是存在误差的,在前后沿窗口中总是会存在强弱杂波的一些混叠,因此在本文设计的如图 1 所示的算法中,以 OS 类统计量计算方法代替了 ML 类统计量计算方法,以提高对背景统计量估计的稳定性。

在图 1 中, x_1, x_2, \dots, x_N 和 y_1, y_2, \dots, y_N 分别表示前端和后端参考单元, Z 代表杂波功率估计,若以均值表示杂波功率估计,则 X 和 Y 的计算公式分别为:

$$X = median(x_1, x_2, \dots, x_N) \tag{1}$$

$$Y = median(y_1, y_2, \dots, y_N) \tag{2}$$

式中, $median(\cdot)$ 表示取中值运算。

可以采用不同的方法对前后参考单元估计出的杂波功率水平 (X 和 Y) 进行组合得到当前检测背景的功率估计 (Z), 这些不同的方法便对应了 CA、GO 和 SO 等 CFAR 检测器。对于 CA-CFAR、GO-CFAR 和 SO-CFAR 这三种检测器,图 1 中给出了相应的 Z 的计算方法。

2.2 检测窗口的前后沿划分方法

在实际 UWBSAR 图像中,强弱杂波的非均匀分布是未知的,它可能分布于上下方向,也可能分布于左右方向,因此可能要从上下方向也可能要从左右方向将检测窗口划分为前沿窗口 (Front Window, 即 FW) 和后沿窗口 (Back Window, 即 BW)。在实际检测中,可先将检测窗口在上下和左右方向都进行划分,然后计算划分后各窗口的 VI 。比较左右划分所得窗口的 VI_{FW} 和 VI_{BW} 之差与上下划分所得窗口的 VI_{FW} 和 VI_{BW} 之差,取差值大的划分方法来获得 FW 和 BW。

2.3 变量索引 VI 的定义与检测窗口的非均匀性判别

均值方差比是一个常用的非均匀性衡量指标,

可以用它作为变量索引 VI 的定义:

$$VI = \frac{E(X)}{\sqrt{E[X - E(X)]^2}} \tag{3}$$

式中, X 表示输入的随机变量, 在本文的算法中是检测单元参考窗口的 FW 或 BW 的杂波数据; $E(\cdot)$ 表示随机变量的期望。于是, 当 VI 小于某个门限值 VI_T 时, 认为检测参考单元中的杂波是均匀的, 否则认为检测参考单元中的杂波是非均匀的。

当 FW 和 BW 都为功率不等的均匀杂波时, 根据 VI 无法判断检测窗口参考单元中的杂波是否均匀, 为此需要借助均值比 (Mean Ratio 即 MR) 来进行判断。定义 FW 和 BW 均值之间的比例为:

$$MR = X_{FW} / X_{BW} \tag{4}$$

式中, X_{FW} 和 X_{BW} 分别表示当前检测单元的 FW 和 BW 的均值或平均幅度。当 FW 和 BW 窗口中都为同一类型的均匀杂波时, MR 的分布独立于杂波功率; 而参考单元的 FW 或 BW 中为非均匀杂波时 (如混入干扰目标或者其他类型杂波), MR 将增大或减小。因此可以设置一个均值比的阈值 R_T ($R_T \geq 1$), 将 MR 与它相比来判断当前检测窗口是否为均匀杂波背景。于是, 当 $R_T^{-1} \leq MR \leq R_T$ 时, 参考单元中为均匀杂波, 否则为非均匀杂波。

2.4 CFAR 检测器的选择方法

通过以上对变量 VI 和 MR 的定义, 下面根据检测单元与杂波边沿的位置关系来说明 VICFAR 检测器如何根据 VI 和 MR 的值选择各种 CFAR 检测算法的方法。

检测单元与杂波边沿的各种位置关系可由图 2 所示的五种情况表示。对应于图 2(b)~图 2(f) 分别有:

(1) 图 2(b) 表示当前检测窗口要么在区域 1 要么在区域 2。此时虽然区域 1 和区域 2 对应的杂波强度不同, 但对应当前窗口来说, 其所面临的杂波背景仍然是均匀的, FW 和 BW 中包含同样的杂波, 可以采用全窗口 CA-CFAR 检测器进行目标检测。可以预见, 这种情况下的 VICFAR 检测器的检测性能

相当于 CA-CFAR 检测器。此时 VI_{FW} , VI_{BW} 和 MR 对应的参数为: $VI_{FW} < VI_T$, $VI_{BW} < VI_T$, $R_T^{-1} \leq MR \leq R_T$ 。

(2) 图 2(c) 表示当前检测单元刚好落在杂波边沿上。经过对参考单元的前后沿窗口划分, FW 只包含区域 1 的杂波, BW 只包含区域 2 的杂波。此时 FW 和 BW 中的杂波都是均匀的。通常在杂波边沿处, 宁可让检测概率受到一定损失, 也要避免检测系统的虚警概率不过多增加, 因此在 FW 和 BW 中选择平均幅度较强的一个作为背景估计杂波数据, 然后采用 CA-CFAR 检测器进行检测, 这在实际操作中相当于选用了 GO-CFAR 检测器。可以预见, 这种情况下, VICFAR 检测器的性能相当于全窗口数目一半的参考单元下的 CA-CFAR 检测器。此时 VI_{FW} , VI_{BW} 和 MR 对应的参数为: $VI_{FW} < VI_T$, $VI_{BW} < VI_T$, $R_T^{-1} > MR$ 或 $MR > R_T$ 。

(3) 图 2(d) 表示当前检测单元在区域 1 中, 当前检测窗口的大部分在区域 1 中, 小部分在区域 2 中。对参考单元的前后沿窗口划分后, FW 只包含区域 1 的杂波, 为均匀杂波, BW 是区域 1 和区域 2 的混合杂波, 为非均匀杂波。由于当前检测单元也在区域 1 中, 故选 FW 的数据用于杂波背景估计, 然后采用 CA-CFAR 检测器进行检测。可以预见, 这种情况下, VICFAR 检测器的性能相当于全窗口数目一半的参考单元下的 CA-CFAR 检测器。此时 VI_{FW} , VI_{BW} 对应的参数为: $VI_{FW} \geq VI_T$, $VI_{BW} < VI_T$, MR 的取值不影响 VI 对 CFAR 检测器的选择。

(4) 图 2(e) 表示当前检测单元在区域 2 中, 当前检测窗口的大部分在区域 2 中, 小部分在区域 1 中。对参考单元的前后沿窗口划分后, BW 只包含区域 2 的杂波, 为均匀杂波, FW 是区域 1 和区域 2 的混合杂波, 为非均匀杂波。由于当前检测单元也在区域 2 中, 故选 BW 的数据用于杂波背景估计, 然后采用 CA-CFAR 检测器进行检测。可以预见, 这种情况下, VICFAR 检测器的性能相当于全窗口数目一半的参考单元下的 CA-CFAR 检测器。此时 VI_{FW} , VI_{BW} 对应的参数为: $VI_{FW} < VI_T$, $VI_{BW} \geq VI_T$, MR

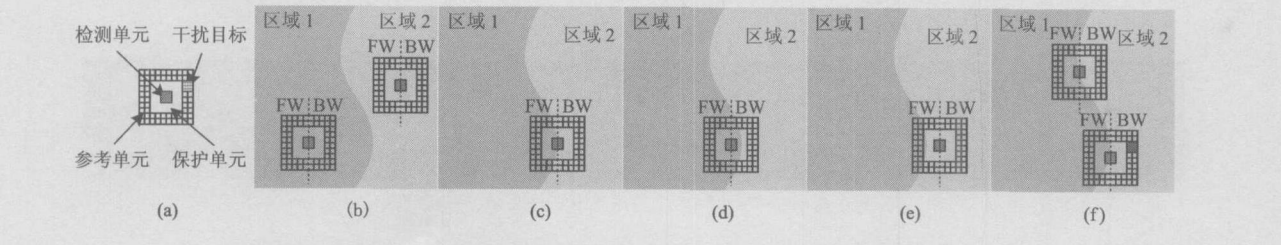


图 2 检测窗口在非均匀杂波背景中的五种情形示意图

Fig. 2 The five cases of the detection window in nonhomogeneous clutter environment

的取值不影响 VI 对 CFAR 检测器的选择。

(5)图 2(f)表示检测单元在杂波边沿。由于杂波边沿是斜的(不是垂直或水平的),对参考单元的前后沿窗口划分后,FW 与 BW 分别包含来自区域 1 和区域 2 的杂波(图 2(f)中位置较高的检测窗),即 FW 和 BW 中都是非均匀杂波。这种情况是非均匀背景目标检测中最常见的,必须加以考虑。应当指出的是,当参考单元中有干扰目标存在时,FW 和 BW 中也都是非均匀杂波(图 2(f)中位置较低的检测窗),因此,为了使虚警概率不至于过分升高,采用 SO-CFAR 检测器。由于 SO-CFAR 检测器选择的参考单元仍然是非均匀的,甚至有可能包含干扰目标,所以在 SO 操作判断数据选择以后,用 OS 来估

计当前检测单元的背景杂波功率,这属于广义有序统计——CFAR (Generalized Order Statistics CFAR, 即 GOS-CFAR)类检测器^[5]。此时 VI_{FW} 、 VI_{BW} 对应的参数为: $VI_{FW} \geq VI_L$, $VI_{BW} \geq VI_L$, MR 的取值不影响 VI 对 CFAR 检测器的选择。

3 实验结果及分析

文献 [2]从各个角度对 VICFAR 检测器的性能进行了分析,所得结果对本文的应用情况也是适用的。本文以一组试验来说明 VICFAR 检测器在 UWBSAR 图像中目标检测的有效性和优越性。

图 3(a)为一幅 UWBSAR 原始图像,图中的目

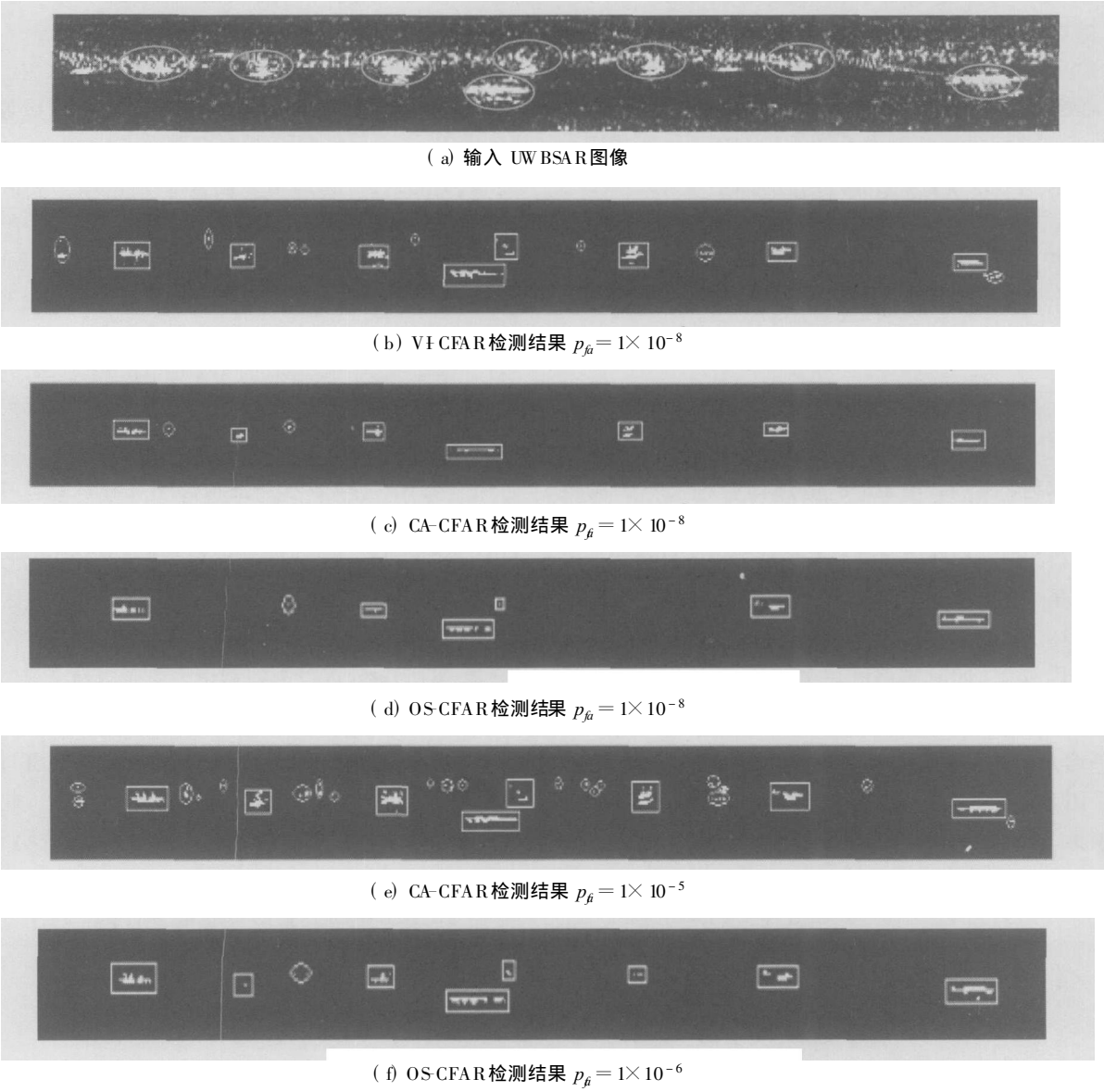


图 3 一组 UWBSAR 图像中 CFAR 目标检测试验结果

Fig. 3 A group experiment results of CFAR detection in UWBSAR image

标布置于路边的树林里, 在叶簇与开阔地之间是杂波的边缘, 图中的椭圆标出了真实目标的位置。在该图像中进行目标检测属于非均匀背景杂波中的目标检测问题。

图 3(b)是本文方法在虚警概率为 $p_{fa} = 1 \times 10^{-8}$ 时的检测结果, 可见目标被全部检测了出来, 虚警目标为 1 个。图 3(c)和图 3(d)是在相同虚警概率下, CA-CFAR 算法和 OS-CFAR 算法的检测结果。虽然虚警目标数与图 3(b)差不多, 但有几个漏警。图 3(e)和图 3(f)是在图像中所有目标都被检测出来时, CA-CFAR 算法和 OS-CFAR 算法的检测结果, 这时出现了很多虚警。

品质因数^[6]是一种衡量目标检测性能的数值指标, 其定义式为:

$$FaM = \frac{N_{tt}}{N_{fa} + N_{gt}}$$

(5)

式中, N_{gt} 为实际目标数, N_{tt} 为正确检测目标数, N_{fa} 为虚警目标数。根据 N_{gt} 和 N_{tt} 可定义检测率为 $p_d = \frac{N_{tt}}{N_{gt}}$ 。对应于图 3 几种检测算法的性能指标如表 1。

表 1 试验结果的性能指标

Table 1 The performance index of the experiment result

结果序号	正确检测目标数	漏检目标数	虚警目标数	检测率 %	品质因数
1	8	0	1	100	0.89
2	7	1	2	87.5	0.7
3	6	2	1	75	0.67
4	8	0	19	100	0.3
5	8	0	5	100	0.62

从图 3 和表 1 可以看出, VICFAR 算法在非均匀 UWBSAR 图像背景中的目标检测性能优于 CA-CFAR 和 OS-CFAR 算法。

4 结 论

结合 OS-CFAR 算法的 VICFAR 检测技术, 能够在非均匀 UWBSAR 背景中实现 CFAR 检测, 它能在均匀区域获得类似于 CA-CFAR 算法的检测性能, 在杂波边缘和干扰目标存在的情况下, 也能发挥 GO-CFAR 和 SO-CFAR 算法的性能, 而在混合了均匀背景、杂波边缘和干扰目标的检测背景下, VICFAR 算法能够在整体上发挥更优秀的性能。

参 考 文 献 (References)

[1] Fang X L, Liang D N, Dong Z. An Adaptive CFAR Processing Method and Its Performance Analysis[A]. 9th Radar Conference of China[C]. Yantai, 2004 [方学立, 梁旬农, 董臻. 一种自适应 CFAR 处理方法及其性能改善分析[A]. 9 届全国雷达会议[C]. 烟台, 2004]

[2] Smith M E, Varshney P K. Intelligent CFAR Processor Based on Data Variability[J]. IEEE Trans on AES, 2000, 36(3): 837—847.

[3] Huang X, Sun H, Luo W, et al. Intelligent CFAR Detector Based on Region Classification for SAR Images[J]. Journal of Wuhan University(Version of science), 2004, 50(1): 104—108 [黄祥, 孙洪, 罗玮等. 基于区域分类的智能恒虚警 SAR 图像目标检测[J]. 武汉大学学报(理学版), 2004, 50(1): 104—108]

[4] Wang H G. CFAR Detection of Foliage Obscured Target for UWBSAR[D]. Master Thesis of National University of Defense Technology, 2004 [王红岗. UWBSAR 叶簇覆盖目标恒虚警检测方法[D]. 国防科技大学硕士论文, 2004]

[5] He Y, Guan J, Peng Y N, et al. Radar Automatic Detection and CFAR Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. [何友, 关键, 彭应宁等. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.]

[6] Zhong J S, Zhu M H. Target Detection Algorithm of SAR Image Based on Local Window K-Distribution[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2003, 25(9): 1276—1280 [钟劲松, 朱敏慧. SAR 图像局部窗口 K-分布目标检测算法[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(9): 1276—1280.]