

中图法分类号: TN957.52 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)04-0674-06

论文索引信息: 袁湛, 何友, 蔡复青. 一种多目标环境下的 SAR 图像自适应 CFAR 检测方法 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(4): 674-679

# 一种多目标环境下的 SAR 图像自适应 CFAR 检测方法

袁湛, 何友, 蔡复青

(海军航空工程学院信息融合技术研究所, 烟台 264001)

**摘要:** 多数 CFAR 检测器在多目标检测环境下需要关于干扰目标的先验信息, 当检测环境发生变化时, 这些检测器很难维持稳定的检测性能。针对多目标环境下的 SAR 图像目标检测, 提出一种新的自适应 CFAR(恒虚警)检测器。该检测器利用局部的杂波功率水平估计以及目标和杂波的方差特征筛选出参考窗中的均匀杂波像素, 同时剔除掉干扰目标像素; 在筛选过程中, 每一步使用的判决门限根据上一步的判决结果自动更新; 最后对筛选出的样本点作单元平均处理形成检验统计量; 完全不需要干扰目标的任何先验信息。利用实测数据仿真研究了该检测器的检测性能与运行效率, 实验结果表明, 相对单元平均 CFAR 检测器及有序统计量 CFAR 检测器, 该检测器提高了检测性能, 保留了目标精细的结构特征, 而运行效率与有序统计量 CFAR 检测器相当, 很具实用性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 图像; 目标检测; 恒虚警率

## Adaptive CFAR detector in a multi-target environment for SAR imagery

Yuan Zhan, He You, Cai Fuqing

(Research Institute of Information Fusion Technology, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001 China)

**Abstract:** Most CFAR detectors need prior information on interfering targets in a multi-target environment, and hence can not keep stable detection performance when the detection environment changes. A new adaptive constant false alarm rate (CFAR) detector, referred as stepwise cumulation CA (SCCA) CFAR detector, is presented for target detection in a multi-target environment for SAR imagery. By employing a cell-to-cell criterion for accepting or rejecting reference samples according to an adaptive threshold, that is, clutter power estimation and standard variance which are independent of interfering targets, the samples from interfering targets are censored and the clutter samples are accumulated stepwisely. The final estimate of the noise level in the cell under test is formed using cell-averaging method with the accumulated homogeneous clutter samples. The detection performance and runtime of SCCA-statistics-based two-parameter CFAR detector are tested and compared with CA-CFAR and OS-CFAR by simulation, and the result shows the proposed detector increases the detection probability, and its runtime approximates that of OS-CFAR.

**Keywords:** SAR; imagery; target detection; CFAR

## 0 引言

在 SAR 图像目标检测领域, 恒虚警(CFAR)检测技术得到了广泛地研究与应用<sup>[1-3]</sup>。针对不同的

检测环境, 人们已经提出了许多的 CFAR 检测器。单元平均(CA)CFAR 检测器在匀质背景区域中具有较好的检测性能, 但在多目标和杂波边缘等环境中虚警率会急剧上升。为了对抗多目标环境中干扰目标对主目标检测的影响, Rohling 提出了有序统计

收稿日期: 2009-12-10; 修回日期: 2010-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(60672140)。

第一作者简介: 袁湛(1983—), 男, 现为海军航空工程学院信息与通信工程专业博士研究生, 主要研究方向为 SAR 图像自动目标识别。E-mail: yuanzhan\_com@yahoo.com.cn。

量(OS)CFAR 检测器<sup>[4]</sup>,但这种检测器的删除点(censoring point)是预先设定的,这意味着需要干扰目标数的先验信息来删除不需要的样本点<sup>[5-6]</sup>。此外,Smith 和 Varshney 提出了一种基于单元平均(CA)CFAR、选大(GO)CFAR 及选小(SO)CFAR 的可变索引(VI)CFAR 检测器<sup>[7]</sup>;Hu 在 Smith 工作的基础上引入 OS CFAR 提出了一种改进型 VI CFAR 检测器<sup>[8]</sup>。但这两种检测器在判断背景杂波的均匀程度及前后窗均值是否相等时引入的是先验阈值,这同样意味着需要背景杂波的先验信息和干扰目标的分布情况。实际上关于背景杂波和干扰目标的先验信息往往无法准确获知,当检测环境发生变化时,这些检测器难以保持稳定的检测性能。为了实现目标的稳健检测,需要研究能够适应干扰目标数目和分布情况变化的自适应类 CFAR 检测器。Tan Tri 提出了一种适用于密集目标环境下的转换(Switching)CFAR 检测器<sup>[9]</sup>;Farrouki 基于有序数据变化统计量提出了一种适用于干扰目标数未知的自动删除单元平均(automatic censoring cell-averaging)CFAR 检测器<sup>[10]</sup>;Liu 等人基于自适应删除单元平均(CCA)CFAR 提出了一种分布式 CCA CFAR 检测器<sup>[5]</sup>。这类检测器的共同特点是在形成检测阈值的过程中不需要目标任何的先验信息,因而更具鲁棒性。

主要研究如何在多目标环境下提高 SAR 图像目标的检测性能,并提出了一种新的自适应 CFAR 检测器—逐步累积单元平均 CFAR 检测器(SCCA-CFAR, Stepwise Cumulation CA-CFAR)。通过将参考窗中的每一个样本点与一个独立于干扰目标的判决门限进行比较,删除参考窗中的干扰目标样本点或者累积均匀杂波样本点,然后重新计算判决门限,再对下一个样本作判决,直至所有样本点完成判决。将剩下的均匀杂波样本做单元平均处理,形成检验统计量,可以完全不需要干扰目标的先验信息。结合双参数 CFAR 方法,将该检测器应用于多目标环境下的 SAR 图像目标检测,结果表明该检测器相对 CA-CFAR、OS-CFAR 检测器在提高检测概率的同时较好地保留了目标的轮廓特征,极大地降低了目标识别的困难。

## 1 逐步累积单元平均 CFAR 检测器

### 1.1 干扰目标样本点删除方案

多目标环境中,干扰目标的出现使检测阈值升

高,对主目标的检测概率会大幅下降,这就是所谓的遮蔽效应,因此必须删除参考窗中的干扰目标样本点。本文提出了一种自动删除参考窗中干扰目标样本点的方案。

假设  $s_1, s_2, \dots, s_N$  是参考窗中的  $N$  个样本点,  $S$  代表这些样本点的集合,即  $S = \{s_i\}, i = 1, 2, \dots, N$ , 需要指出的是这里并没有对  $S$  中的样本点进行排序。令  $S_h$  为参考窗中经门限比较后被认定为杂波样本所组成的集合,  $M$  为  $S_h$  中样本点的个数。对  $S$  中的每一个样本点  $s_i$  做出如下的二元判决

$H_0: s_i$  为杂波样本点

$H_1: s_i$  为干扰目标样本点

当  $H_1$  成立时,将  $s_i$  从参考窗中删除,具体流程如下:

1) 从  $S$  中任选出两个样本点  $s_i, s_j$  作为  $S_h$  的初始集(在仿真中我们发现随机选取初始样本点不会对算法造成显著影响),即  $S_h^0 = \{s_i, s_j\}$ 。不失一般性,可令  $i = 1, j = 2$ 。

2) 根据  $S_h^0$  中样本点计算杂波功率水平与标准偏差

$$Z_T^0 = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M s_k \quad (1)$$

$$D_T^0 = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (s_k - Z_T^0)^2} \quad (2)$$

3) 从  $S$  中取出第 3 个样本点  $s_3$ , 综合  $Z_T^0$  与  $D_T^0$  作为自适应判决门限对  $s_3$  做如下的判决

若  $|s_3 - Z_T^0| < D_T^0$  则  $H_0$

若  $|s_3 - Z_T^0| > D_T^0$  则  $H_1$

当  $H_0$  成立时,将  $s_3$  加入  $S_h$  中,此时  $S_h^1 = \{s_1, s_2, s_3\}, M = 3$ , 根据式(1)(2)利用  $S_h^1$  中的样本点重新计算杂波功率水平  $Z_T^1$  和标准偏差  $D_T^1$ ; 当  $H_1$  成立时,将  $s_3$  从参考窗中删除。

4) 对参考窗中剩下的样本点重复 2)3) 的过程。令  $s_l$  为  $S$  中第  $l+2$  个待判决样本点,  $S_h^l, Z_T^l, D_T^l$  分别为判决第  $l+1$  个样本点后形成的均匀背景杂波样本集、杂波功率水平、标准偏差,对  $s_l$  做出判决

若  $|s_l - Z_T^l| < D_T^l$  则  $H_0$

若  $|s_l - Z_T^l| > D_T^l$  则  $H_1$

当  $H_0$  成立时,将  $s_l$  加入  $S_h$  中,否则删除  $s_l$ 。

当  $S$  中的所有样本点都经过如上过程的判决后,对最后形成的  $S_h$  中的样本做单元平均处理,形成最终的杂波功率水平估计

$$Z = \frac{1}{M} \sum_{s_j \in S_h} s_j \quad (3)$$

图 1 给出了干扰目标样本点删除方案的流程图。

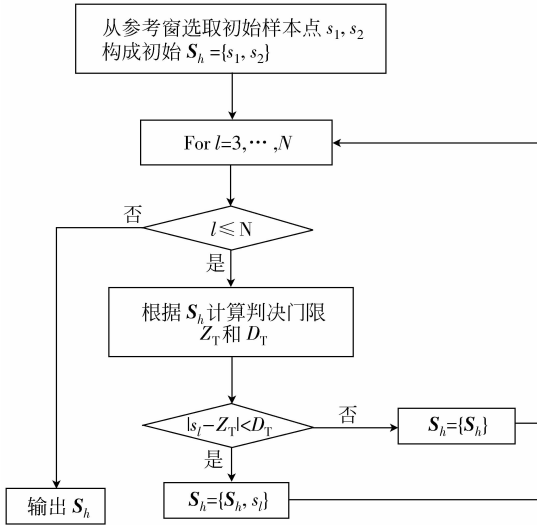


图 1 干扰目标样本点自动删除流程图  
Fig. 1 The flow chart of censoring samples of interfering targets

该方案具有以下特点: 1) 与文献[5, 10]不同的是, 在筛选杂波样本时, 上述方案并没有在一开始就将参考窗中的所有样本点用来估计杂波功率水平  $Z_T$ , 这样做的目的是避免干扰目标对自适应判决门限  $Z_T$  与  $D_T$  的影响, 确保筛选的准确性, 从  $Z_T$  与  $D_T$  的计算式(式(1)(2))中看出, 它们并不包含有干扰目标的样本点; 2) 该方案不直接将被判决的样本点与估计的杂波功率水平做比较, 而是使用了一个判别距离  $D_T$ , 只有被判决的样本点与  $Z_T$  之间的距离大于  $D_T$  时才认为该样本点来自于干扰目标。因为根据随机变量的特性, 样本点会在均值附近波动, 波动范围从平均意义上讲就是标准偏差, 因此落入这个波动范围内的样本点有理由认为来自均匀背景杂波(在 2.2 节中还将对使用  $D_T$  作为判别距离的合理性做进一步地分析), 反之将被视为来自于干扰目标。从上述干扰目标样本点的删除过程可以看出, 样本点集  $S_h$  的形成过程是一个均匀背景杂波样本点逐步累积的过程并且涉及了对这些样本点做单元平均处理, 因此将这种 CFAR 检测器称为逐步累积单元平均 CFAR 检测器。

## 1.2 SCCA-CFAR 检测器

设  $s_0$  为待检测的样本点, 根据实际情况设定一

定长度的保护窗与参考窗。对于每个待检样本点, SCCA-CFAR 方法包含以下几个步骤:

- 1) 选择合适的杂波统计模型;
- 2) 根据 1.1 节给出的方案筛选出均匀杂波的样本点集  $S_h$ , 并根据这些样本点使用经典参数估计方法或者梅林变换估计出统计模型的参数;

- 3) 计算检验统计量  $Z = \frac{1}{M} \sum_{s_j \in S_h} s_j$ ;

- 4) 根据预先设定的虚警概率  $P_{fa}$  确定标称化因子  $T$ ;

- 5) 根据自适应判决准则  $s_0 \begin{matrix} > & H_1 \\ < & H_0 \end{matrix} TZ$  做出检验判决。

图 2 为 SCCA-CFAR 检测器方框图。

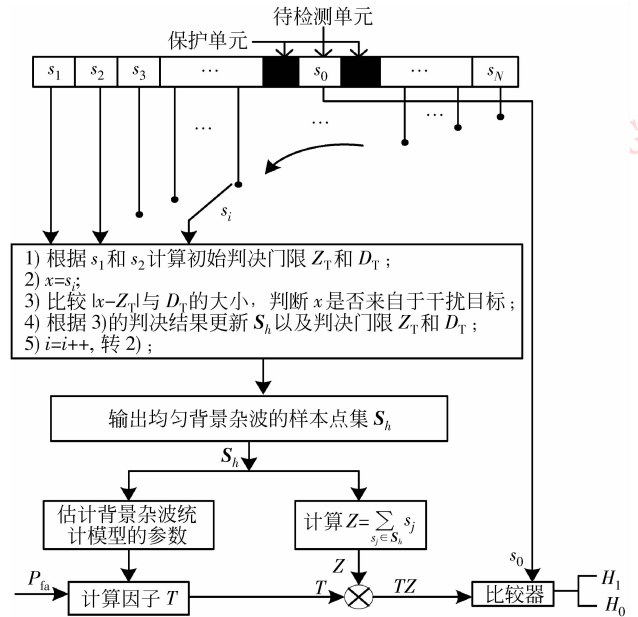


图 2 SCCA-CFAR 检测器流程图

Fig. 2 The flow chart of SCCA-CFAR detector

## 2 基于 SCCA-CFAR 检测器的 SAR 图像目标检测方法

### 2.1 双参数 CFAR 检测方法

SAR 图像目标的 CFAR 检测方法基于这样一个事实: 目标的雷达截面积(RCS)在平均意义上要高于背景杂波的 RCS。当不存在相干斑时, 在 SAR 图像上就表现为目标像素的灰度值要高于背景杂波像素的灰度值。这使得我们可以利用图像的对比度特征进行目标检测。目前最具实用性的是双参数

CFAR 检测方法, 它以其较低的计算复杂度和具有简单的杂波自适应统计量成为检测 SAR 图像目标的一种最基本的方法<sup>[1,11]</sup>。

双参数 CFAR 检测方法根据目标与背景杂波反射率的不同辨别目标与杂波, 通过使用一个滑窗遍历 SAR 图像中的每一个像素, 根据贝叶斯判决准则及其各种派生准则对被测像素点做出二元判决, 以确定该像素点是否为目标像素点。滑动窗口由 3 个部分组成: 目标区, 保护区、背景杂波区, 如图 3 所示。

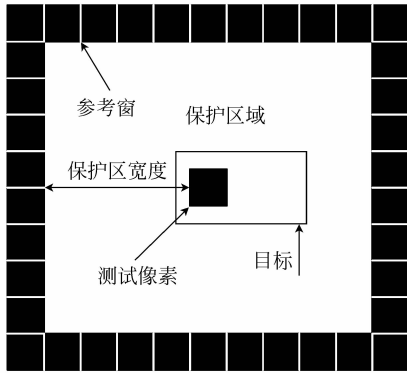


图 3 双参数 CFAR 检测器

Fig. 3 Two-parameter CFAR detector

CFAR 窗以待测像素为中心, 其内参考窗的半径(即保护区的宽度)至少应为目标长度的大小以保证目标像素不会泄露到背景区域而影响对杂波的估计。传统的双参数 CFAR 检测方法计算如下的检测统计量

$$D = \frac{X_i - \hat{\mu}_c}{\hat{\sigma}_c} \quad (4)$$

并做出如下的检测判决

$$\begin{cases} D > K_{CFAR} & \text{目标像素} \\ D < K_{CFAR} & \text{杂波像素} \end{cases}$$

式中,  $X_i$  为待测像素点的灰度值,  $K_{CFAR}$  为 CFAR 检测门限,  $\hat{\mu}_c$  和  $\hat{\sigma}_c$  分别为估计的杂波均值与标准偏差。当采用 CA-CFAR 作为检测器时,  $\hat{\mu}_c$  和  $\hat{\sigma}_c$  可由下式计算

$$\hat{\mu}_c = \frac{1}{N} \sum_{i,j \in \Theta} s(i,j) \quad (5)$$

$$\hat{\sigma}_c = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i,j \in \Theta} (s(i,j) - \hat{\mu}_c)^2} \quad (6)$$

式中,  $\Theta$  为图 3 中参考窗,  $N$  为  $\Theta$  中的样本点数,  $s(i,j)$  为  $\Theta$  中的样本点。

## 2.2 SAR 图像目标的 SCCA-CFAR 检测方法

传统的双参数 CFAR 检测方法采用了 CA-CFAR 检测器。当参考窗中有邻近目标泄露的像素时, 这种检测方法很难检测到目标。林肯实验室<sup>[12]</sup>提出了一种基于有序统计量的双参数 CFAR 检测方法(OS-CFAR)。该方法基于有序统计量估计  $\hat{\mu}_c$  和  $\hat{\sigma}_c$ , 相对传统的双参数 CFAR 检测方法对多目标背景不那么敏感。本文将 SCCA-CFAR 检测器应用到双参数 CFAR 检测方法中。首先使用 SCCA-CFAR 检测器删除干扰目标泄露到参考窗中的像素, 筛选出均匀像素集, 然后对该像素集中的像素作式(5)(6)的单元平均处理, 最后由式(4)获得检验统计量  $D$  并对测试像素做出判决。

由于目标的形状是规则的, 可以认为目标是由少量的角反射体构成, 这些反射体会导致较强的反射回波, 因此在 SAR 图像中目标区域具有较大的灰度值; 而自然杂波中由于没有较强的散射体, 其灰度值相对目标来讲通常较低, 这使得目标像素的灰度值的方差通常要大很多, 从而方差特征可以被用于鉴别目标像素和杂波像素<sup>[1,11]</sup>。受此启发, 在设计 SCCA-CFAR 检测器时, 设定了一个判别距离—标准偏差  $D_r$ , 以更加准确地区分目标像素与杂波像素, 避免因杂波像素被错误地剔除而使杂波功率水平的估计精度降低。

## 3 仿真实验及结果分析

采用 SAR 实测数据对 CA-CFAR、OS-CFAR、SCCA-CFAR 检测器在多目标环境下的检测性能和运行效率进行仿真比较, 采用双参数 CFAR 检测方法。仿真实验环境为: 双核 CPU (1.60 GHz × 2), 512 M 内存。图 4(a) 为含有多个飞机目标的原始 SAR 图像, 图像大小为 236 × 40, 图像分辨率大小为 3 m × 3 m。仿真实验中, 参考窗的大小为 5 × 5 像素, 保护区的大小为 5 × 5 像素, 恒虚警率为  $P_{fa} = 10^{-4}$ 。

在检测性能方面, 比较 3 种检测器的检测结果(图 4(b)–(d)) 可以看到, 在多目标环境下, CA-CFAR 检测器只是将目标中最亮的那些像素点检测出来, 而无法检测那些灰度值与杂波像素相近的目标像素点, 这导致目标像素丢失较多, 目标的结构特征无法保留, 利用这些点做目标识别有较大的困难。相对 CA-CFAR 检测器, OS-CFAR 检测器的检测概率有

一定程度的提高,目标轮廓开始显现,但检测出来的目标区域仍然是不连续的。SCCA-CFAR 检测器在 OS-CFAR 检测器的基础上检测概率又有所提高,目标轮廓特征保留较完整,有利于下一步的目标识别。从图 4(d)中可以清晰地看到飞机的形状。需要指出的是,由于 SCCA-CFAR 检测器提高了检测概率,相应的虚警概率也提高了,这些虚警像素可以在鉴别阶段剔除。

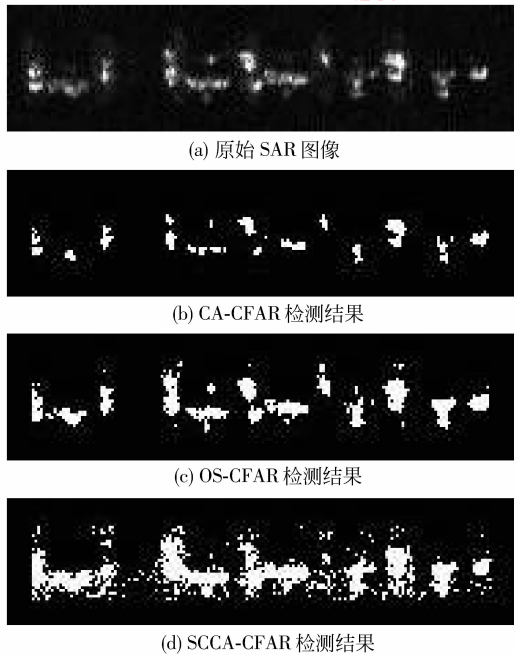


图 4 原始 SAR 图像及 3 种 CFAR 检测器检测结果  
Fig. 4 The origin SAR imagery and detection results of three CFAR detectors

在运行效率方面,表 1 列出了 3 种检测器在相同仿真环境下的运行时间。从表中可以看到 CA-CFAR 检测器的运行时间最短;SCCA-CFAR 检测器的运行时间稍低于 OS-CFAR 检测器,但都比 CA-CFAR 检测器的多出两倍,这是因为这两种检测器均涉及了复杂的排序和比较操作,因而更加耗时,但却换来了检测性能的提升。此外,一个值得注意的结论是:本文提出的检测器无论在检测性能方面还是在运行效率方面均优于 OS-CFAR 检测器,因而更具实用性。

表 1 3 种 CFAR 检测器的运行时间

Tab. 1 Runtime of three CFAR detectors

	CA-CFAR	OS-CFAR	SCCA-CFAR
运行时间/s	5.886 065	16.848 930	14.171 704

## 4 结 论

如何实现多目标环境下稳健地检测出目标而又不显著提高算法的复杂度,是 SAR 图像自动检测领域一个极富研究意义的课题。传统的 CA-CFAR 检测器在多目标环境下的检测概率不高,存在较多的目标像素丢失,目标的细微结构特征无法保留,给下一步的目标识别带来较大的困难;针对多目标环境提出的有序统计类 CFAR 检测器在删除参考窗中干扰目标的样本点时需要干扰目标的先验信息,因而在目标数目和分布情况变化时无法稳健地检测出目标。本文提出的自适应 CFAR 检测器,完全不需要干扰目标的任何先验信息,因而在复杂多变的实际检测环境中也能够保持优良的检测性能。此外,由于目标的形状特征保留较完整,这可以简化目标鉴别与分类阶段的算法设计,缩短实时自动目标识别(ATR)系统宝贵的处理时间。仿真实验结果表明,基于 SCCA-CFAR 检测器的双参数 CFAR 检测方法在检测性能上要优于林肯实验室采用的 CA-CFAR、OS-CFAR 双参数 CFAR 检测方法。

## 志 谢

中国电子科技集团第 38 研究所提供了原始 SAR 数据,蔡复青博士根据这些原始数据设计了成像算法,他们提供了本文研究的基础,在这里一并表示感谢。

## 参考文献 (References)

- [1] Kaplan M. Improved SAR target detection via extended fractal features [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(2):436-451.
- [2] Maurizio D B, Carmela G. CFAR Detection of extended objects in high-resolution SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(4):833-843.
- [3] Zhang Liang, Li Yu, Ji Kefeng, et al. ACCA-CFAR detection with adaptive threshold [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2009, 31(1):160-163. [张亮, 李禹, 计科峰, 等. SAR 图像局部自适应 ACCA-CFAR 检测算法 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(1):160-163.]
- [4] Rohling H. Radar thresholding in clutter and multiple target situation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1983, 19(4):608-621.

- [ 5 ] Liu Panzhi, Han Chongzhao, Lei Ming, et al. Adaptive censored cell-averaging CFAR detection in distributed sensor networks [ C ]//Proceedings of the 10th International Conference on Information Fusion. New York, USA: IEEE, 2007:1-9.
- [ 6 ] He You, Guan Jian, Peng Yingning, et al. Automatic Radar Detection and Constant False Alarm Processing [ M ]. Beijing: Publishing House of Tsinghua University, 1999: 109-135. [ 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, 1999:109-135. ]
- [ 7 ] Smith M E, Varshney P K. Intelligent CFAR processor based on data variability [ J ]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(3):837-847.
- [ 8 ] Hu Wenlin, Wang Yongliang, Wang Shouyong, et al. A robust CFAR detector based on ordered statistics [ C ]//Proceedings of CIE International Conference on Radar. New York, USA: IEEE, 2006:1-4.
- [ 9 ] Tan Tri, Cao Van. A CFAR algorithm for radar detection under sever interference [ C ]//Proceedings of International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing. New York, USA: IEEE, 2004:167-172.
- [ 10 ] Farrouki A, Barkat M. Automatic censoring CFAR detector based on ordered data variability for nonhomogeneous environment [ C ]//Proceedings of IEEE International Conference on Radar, Sonar, Navigation. New York, USA: IEEE, 2005, 152(1):43-51.
- [ 11 ] Kaplan L M, Murenzi R. Evaluation of CFAR and texture based target detection statistics on SAR imagery [ C ]//Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. New York, USA: IEEE, 1998, 4:2141-2144.
- [ 12 ] Novak L M, Hesse S R. On the performance of order-statistics CFAR detectors [ C ]//The Conference Record of the Twenty-Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. New York, USA: IEEE, 1991:835-840.