

基于有序数据可变索引的 SAR 图像目标检测方法

李 禹^{①②} 计科峰^① 粟 毅^①

^①(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

^②(西安武警工程学院通信工程系 西安 710086)

摘 要: 该文提出了一种基于有序数据可变索引(Ordered Data Variability Index, ODVI)的 SAR 图像目标恒虚警检测算法, 该算法首先对待测像素的参考窗进行基于 ODVI 的自适应筛选处理(Automatic Censoring, AC), 以去除窗内的强杂波和干扰像素, 并以窗内保留的均匀像素对背景的统计特性进行建模, 估计其概率密度函数的参量, 同时构建双参数恒虚警检测(CFAR)的检验统计量, 计算检测的自适应阈值, 实现检测的判决。论文给出了该算法的检测性能曲线, 并利用实测的 X 波段 SAR 图像进行实验验证, 与其它检测方法进行比较, 结果显示该文算法具有较好的检测性能和较低的虚警概率。

关键词: SAR; 目标检测; 有序数据可变索引; 自动筛选; 恒虚警检测

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)02-0314-04

SAR Image Target Detection Based on ODVI

Li Yu^{①②} Ji Ke-feng^① Su Yi^①

^①(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

^②(Engineering College of Armed Police Forces, Xi'an 710086, China)

Abstract: A new CFAR method for SAR image target detection based on ODVI-AC is proposed in this paper. The reference cells of the test cell are firstly processed by an automatic censoring algorithm in order to remove the cells of clutter and interfering targets in the reference window. The remaining cells which are homogeneous can be used to describe the statistical property of the local environments and to evaluate the parameters of the probability density function. The remaining cells can also used to yield the test statistics of two-parameter CFAR detector and calculate the adaptive CFAR threshold. The performance of ODVI-AC CFAR detector is analyzed theoretically to show its superiority. Finally, the field X band SAR image data is used as test data for this algorithm, and the comparison with other CFAR methods is favorable to the ODVI-AC CFAR in this paper.

Key words: SAR; Target detection; Ordered Data Variability Index (ODVI); Automatic censoring; CFAR

1 引言

SAR 图像目标检测是一个二元假设检验问题, 可以基于 MAP 等准则形成最优检测方法。然而, 在实际检测过程中, 由于难以准确描述目标的概率密度函数, 从而采用次优的异常检测策略^[1], 即利用背景的统计特性, 基于恒虚警准则计算检测阈值, 并比较待测像素的异常程度, 来判决目标的存在与否。因此, 准确估计背景统计特性, 形成自适应检测阈值是 SAR 图像目标检测的核心问题。

目前, 常用的 SAR 图像目标检测方法有均值类 CFAR 和有序统计量恒虚警检测(OS-CFAR)。均值类 CFAR 在均匀环境中对背景概率密度函数模型有较好的估计, 检测性能良好, 然而, 在非均匀环境时检测性能有很大程度下降。OS-CFAR 可以改善均值类 CFAR 在非均匀背景环境的稳健性, 但是有较多的虚警, 并且在均匀区域检测性能比均值类

CFAR 差。

为了提高背景统计特性的估计精度, 进而提高检测性能, 本文考虑对参考窗内的像素进行自动筛选处理^[2], 去除参考窗内的强杂波和干扰单元, 选择具有相似统计特性的均匀像素来估计背景的概率密度函数, 构建检测的统计量, 计算自适应检测阈值, 实现恒虚警检测。文中在参考窗内杂波和干扰单元未知情况下, 引入有序数据可变索引参与自动筛选处理 (Ordered Data Variability Index Automatic Censoring, ODVI-AC)^[3], 设定自动筛选阈值去除强杂波和干扰单元, 保留参考窗内的均匀像素, 以此构建待测像素局部背景的统计模型, 并估算模型参量, 最后利用高斯分布的双参数 CFAR 实现 SAR 图像目标的恒虚警检测。

2 ODVI 的数学模型及特性分析

设定 $\{X_i, i=1, 2, \dots, N\}$ 满足升序排列, 即 $0 < X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_N$, 该序列的可变索引 (Variability

Index, VI)是与序列方差和均值的估计值有关的二阶统计量,模型定义如下^[4]:

$$VI = 1 + \frac{\hat{\sigma}^2}{\hat{\mu}^2} = 1 + \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \frac{(X_i - \hat{\mu})^2}{(\hat{\mu})^2} \quad (1)$$

式中 $\hat{\sigma}^2$ 和 $\hat{\mu}$ 分别为序列方差和均值的估计值。为了便于计算,本文利用简化的 VI^* 来替代 VI, VI^* 定义为^[3]

$$VI^* = N \sum_{i=1}^N (X_i)^2 \left/ \left(\sum_{i=1}^N X_i \right)^2 \right. \quad (2)$$

式(2)在满足 $N \geq N_{\min}$ ($N_{\min} = 12$)时, VI^* 的概率分布函数将会逼近 VI 的概率分布^[4]。由序列 $\{X_i\}$ 构建长度为 $P+1$ 新的序列组合 $E_x = \{X_1, X_2, \dots, X_P, x\}, x = X_{N-k}, 0 \leq k \leq N-P-1$ 。序列 E_x 的可变索引定义为 $V(x)$, 则

$$V(x) = \frac{\sigma_P + x^2}{(\mu_P + x)^2} \quad (3)$$

式中 $\mu_P = \sum_{i=1}^P X_i$, $\sigma_P = \sum_{i=1}^P X_i^2$ 。 $V(x)$ 的导数为

$$V'(x) = \frac{dV(x)}{dx} = \frac{\mu_P x^2 + (\mu_P^2 - \sigma_P)x - \mu_P \sigma_P}{(\mu_P + x)^4} \quad (4)$$

式(4)的两个根分别为 $\chi_0 = -\mu_P$, $\chi_1 = \sigma_P/\mu_P$ 。由于 μ_P 和 σ_P 是正值,由二次函数性质知:

$$V'(x) > 0, \quad x > \chi_1 \quad (5)$$

所以知 χ_1 是 $V(x)$ 一个局部极小值,并且在 $x \geq \chi_1$ 时 $V(x)$ 是一个单调递增的函数,可写为

$$\chi_1 = X_P \frac{1 + \sum_{i=1}^{P-1} (X_i/X_P)^2}{1 + \sum_{i=1}^{P-1} (X_i/X_P)} \quad (6)$$

式(6)中参数 $X_i/X_P, i = 1, 2, \dots, P-1$ 都小于 1,可以判定 $\chi_1 \leq X_P \leq X_{P+1}$ 。因为在区间 $[X_{P+1}, X_N]$ 上, $V(x)$ 随着 x 的增大而增大。定义序列 $\{V_k\}$ 为

$$\{V_k = V(x)|_{x=X(N-k)}, k = 0, 1, \dots, N-P-1\} \quad (7)$$

当 $x \geq X(P+1)$ 时 $V(x)$ 是增函数,则序列统计量 V_k 满足:

$$V_{N-p-1} \leq V_{N-p-2} \leq \dots \leq V_1 \leq V_0 \quad (8)$$

是一个递减的序列。有序数据 $\{X_i\}$ 的可变索引 $\{V_k\}$ 具有递减特性,可以用来作为自动筛选算法的判决依据,在下面进行详细分析。

3 基于 ODVI-AC 的 CFAR 检测

本文采用双参数 CFAR 检测,设定背景服从正态分布; $\{X_i\}$ 是由参考窗内的背景像素经过升序排列构成的,在检测中引入 ODVI 来自动筛选出背景窗内的均匀像素组合。

3.1 基于 ODVI 背景参考单元的自动筛选处理

由 $\{V_k\}$ 序列的递减特性可知:当 $k_1 < k_2$ 时 $V_{k_1} > V_{k_2}$ 。如果能判定 V_{k_1} 对应的子序列 $E_{x_1} = \{X_1, X_2, \dots, X_P, x_1 = X(N-k_1)\}$ 是均匀的,则也可以判定 V_{k_2} 对应自序列 $E_{x_2} = \{X_1, X_2, \dots, X_P, x_2 = X(N-k_2)\}$ 是均匀的。同样对于满足 $x \leq X(N-k_1)$ 的每一个子序列 $E_x = \{X_1, X_2, \dots, X_P, x\}$

也是均匀的。事实上,如果在对 $\{X_i\}$ 中均匀像素的自动筛选过程中,其第 k 步 ($0 \leq k \leq N-P-1$) 的子序列 $E_x|_{x=X(N-k)}$ 被称为是均匀的,那么将判定排列单元 $X_1 \leq \dots \leq X_{N-k-1} \leq X_{N-k}$ 对应于均匀背景,这样 K 个可能是杂波和干扰的最大值单元将被去掉。

因此,对于 $E_x = \{X_1, X_2, \dots, X_P, x\}$ 而言,如果 $P \geq N_{\min}$, $\{X_i\}$ 序列中的 P 个最小单元将代表背景水平的初步估计,通过设定 ODVI 的判决阈值,在 $0 \leq k \leq N-P-1$ 进行依次计算 V_k ,并设定阈值进行判决,最终筛选得到最大的均匀像素集合,从而可以构建待测像素局部背景的概率密度模型,并估算其参量。

3.2 基于 ODVI-AC 的 CFAR 检测

基于 ODVI-AC 的 SAR 图像目标 CFAR 检测的流程见图 1。对 SAR 图像的待检测像素 X_0 做加窗处理。 X_0 参考窗内的像素构成集合 $\{y_i, i = 1, \dots, N\}$,该序列首先进行基于 ODVI 的自动筛选处理,以获取最大的均匀区域像素集合。 $\{y_i\}$ 经升序排列后,得到有序序列 $\{X_i, i = 1, \dots, N\}$,序列 $\{X_i\}$ 参与到自动筛选的循环中,循环的终止条件是 ODVI 函数 V_k 的判决表达式, S_k 是第 k 步循环中 V_k 的阈值;满足判决,则筛选结束,输出均匀像素的最大集合 $A = \{X_i, i = 1, \dots, N-k\}$ 。

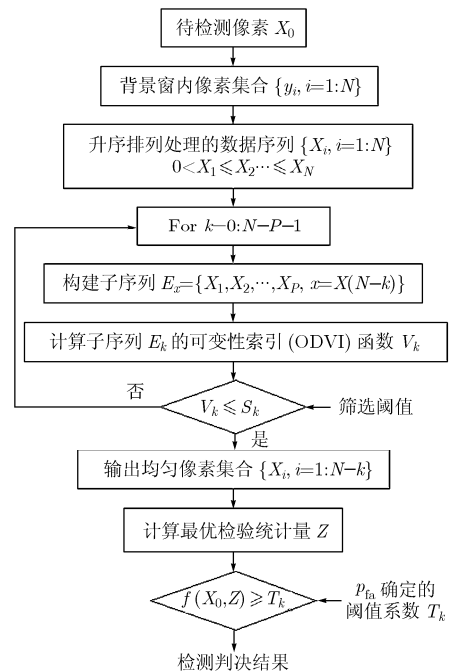


图 1 基于 ODVI-AC 的 CFAR 检测的流程

通常检验统计量记为 $Z = \sum_{i=1}^{N-k} X_i$, 因此 Z 的概率密度函数满足^[5]:

$$\rho_z(z) = \rho_{x_1} * \rho_{x_2} * \dots * \rho_{x_{N-k}} \quad (9)$$

式(9)计算比较复杂,难以得到闭合的表达式。因此,本文结

合 ODVI-AC 得到的均匀像素集合 A 和均值类 CFAR 对均匀像素区域有较好的检测性能的特点, 采用高斯正态分布的双参数 CFAR^[6], 构建新的检验统计量:

$$Z = \frac{X_0 - \hat{u}_A}{\hat{\sigma}_A} = \frac{X_0 - \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} X_i}{\sqrt{\frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} X_i^2 - \left(\frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} X_i \right)^2}} \quad (10)$$

当 X_0 像素分别为背景和为目标时, 计算检验统计量 Z 的概率密度函数, 并以此计算对应于集合 A 的自适应检测阈值 T_k 。

设 \hat{u}_A 和 $\hat{\sigma}_A$ 分别为 A 的均值和均方差的估计值。简化 CFAR 处理过程, 不考虑 \hat{u}_A 和 $\hat{\sigma}_A$ 的随机性。这样检验统计量 Z 可以认为是正态分布, 所以相应的自适应检测阈值 T_k 也是与 A 有关的常量, 这将很大程度上减少检测的计算复杂度, 提高检测的效率和稳健性。

3.3 基于 ODVI-AC 中阈值 S_k 的计算

假定在筛选的每一次循环中都保持恒定的虚警概率 P_{FC} , 则在第 K 步的筛选过程中, P_{FC} 表示为

$$P_{FC} = \Pr(V_k > S_k | E_{x=X(N-K)} \text{ is homogeneous}) \quad (11)$$

设定 SAR 图像数据满足正态分布, CFAR 参考窗内的 SAR 数据组为 $\{y_i, i = 1, 2, \dots, N\}$, 其概率分布函数为

$$\rho_{y_0}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(y-u)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (12)$$

$P_y(y)$ 是 $\{y_i\}$ 的分布函数。按照前面的 ODVI 的定义知道, $\{X_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ 是 $\{y_i\}$ 的升序排列, 其中 $\{X_i\}$ 序列中任一位置 $j \in (1, N)$ 元素的概率密度函数为^[7]

$$\rho_x(x) = j C_N^j [1 - P_y(x)]^{N-j} [P_y(x)]^{j-1} \rho_y(x) \quad (13)$$

由 E_x 知道, $x = X_{N-k}$, $0 \leq k \leq N - P - 1$, 则 $j = N - k$ 。在本节的理论分析中, 为了简化推导, 考虑数据具有标准正态分布, 忽略 V_k 计算中 μ_p 和 σ_p 的随机性, 并设定 $V(x)$ 的逆函数为 $h(x)$, 可以得到 V_k 的概率密度函数:

$$\rho_v(v) = \rho_x[h(v)]h'(v) \quad (14)$$

筛选判决的阈值 S_k 由设定的虚警概率的计算得到:

$$P_{FC} = \int_{S_k}^{+\infty} \rho_v(v) dv = \int_{S_k}^{+\infty} \rho_x[h(v)]h'(v) dv \quad (15)$$

将式(13)代入式(15), 可以得到:

$$P_{FC} = (N-k) C_N^{N-k} \cdot \left\{ \sum_{s=0}^{N-k} C_{N-k-1}^s (-1)^s \frac{1 - \{\Phi^{-1}[h(S_k)]\}^{s+k+1}}{s+k+1} \right\} \quad (16)$$

式中 $\Phi^{-1}[h(S_k)]$ 是 $\Phi[T]$ 的逆函数, $\Phi[T] = \int_{-\infty}^T \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy$ 。利用式(16)可以计算得到 ODVI 的判决阈值 S_k 。

3.4 基于 ODVI-AC CFAR 的检测性能

设定背景为 $\rho_{y_0}(y)$ 高斯分布, 目标为 Swerling II 模型, 对基于 ODVI-AC 的 CFAR 检测性能进行理论分析, 验证该

方法的有效性。图 2 给出了本文基于 ODVI-AC 的 SAR 图像 CFAR 检测的 ROC 曲线, 并与 CA-CFAR 和 OS-CFAR 的 ROC 曲线作比较。从图中可知本文算法在较低的 SCR 环境中仍有较好的检测性能, 在理论上验证了本文算法具有较好性能。

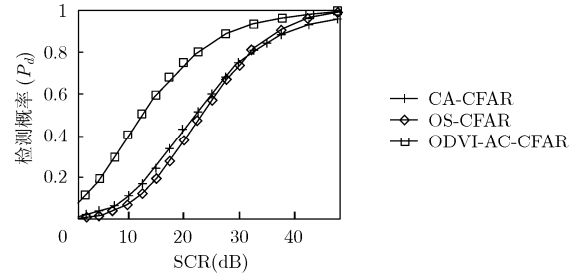


图2 3种检测方法的ROC曲线

4 实验结果及分析

本文采用 X 波段 0.5m 分辨率的 SAR 数据, 见图 3(a), 由先验知识知道图中包括 4 个机动目标。采用相同的参考窗, 以及背景和目标的概率密度模型, 分别基于均值 CFAR, OS-CFAR 和 ODVI-AC-CFAR 三种方法对该数据进行处理, 并分析其检测性能。考虑图像中目标的尺寸, 设定待测像素的参考窗为 $N_0 \times N_0$, 其中 $M \times M$ 为目标的警戒窗。本文数据中 $N_0 = 41$, $M = 39$ 。

原始 SAR 图像经过上述 3 种算法检测后, 统一做相同的鉴别处理, 鉴别特征为目标区域面积, 以保证尽量保留已检测目标的信息, 处理的结果分别见图 3(b), 图 3(c) 和图 3(d)。

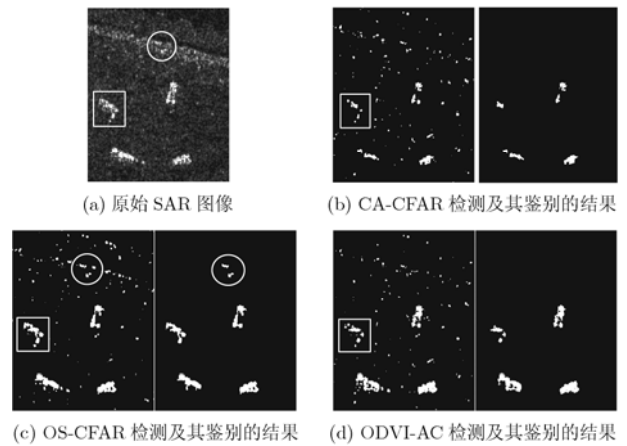


图3 X波段SAR图像(包括4个机动目标)的检测结果

本文的 SAR 图像数据中, 目标的背景区域是非均匀的, 存在后向散射比较强的干扰地物, 致使背景像素有较大的起伏, 所以 CA-CFAR 检测的结果较差, 该方法在一定程度上压缩目标的边缘像素, 使检测的目标区域面积变小, 见图

3(b), 这将很大程度上影响后续目标特征提取和识别。OS-CFAR 能够较好适应非均匀的背景, 检测性能较好, 检测出的目标区域较为完整, 然而 OS-CFAR 将后向散射比较强的背景地物检测为目标, 产生虚警, 如图 3(c)中椭圆虚线内的虚假目标。本文的检测方法采用基于 ODVI 的自动筛选处理, 能较好去除参考窗内的强杂波和干扰, 从而使算法对干扰不敏感, 能较为准确估计背景统计特性, 改善了均值类 CFAR 对非均匀背景的适应性, 提高了检测性能, 同时也避免 OS-CFAR 算法产生的虚警, 图 3(d)的结果也显示了本文算法的检测性能优于 CA-CFAR 和 OS-CFAR。本文在检测环节采用高斯分布的双参数 CFAR, 该方法可以检测到目标区域内像素辐射特性的畸变, 如图 3 中的矩形虚线框内目标区域所示。在原始数据图中矩形虚线内目标区域像素的辐射强度发生突变, 出现断裂现象。本文算法检测到这种目标畸变现象, 在检测结果中目标区域像素被隔离成几个区域, 因此, 本文的算法可以实现对目标的精细检测。

5 结束语

待测像素局部背景的统计特性分析是 SAR 图像目标检测的基础, 选取较大的均匀背景像素集合可以建立准确的背景概率密度函数模型, 有助于提高检测性能。针对待测像素参考窗内局部背景的不均匀性, 本文探讨了在目标和背景分别为 Swerling II 模型和正态分布情况下, 基于 ODVI-AC 的恒虚警检测方法, 并与 CA-CFAR 和 OS-CFAR 的检测性能做了比较, 实验结果表明本文提出的方法具有较好的检测性能。同时, 本文方法中采用的双参数 CFAR 具有结构简单, 计算量小和性能稳健的优点。由于 SAR 图像统计特性难以用一种模型准确描述, 所以在背景不满足正态分布假设下, 本文方法将在检测阶段增加复杂性, 恒虚警检测策略将适当调整, 但是基于 ODVI-AC 对参考窗像素的筛选处理的方法

具有通用性, 可以针对不同的分布利用本文第 3 节的推导公式计算其相应筛选阈值。

参 考 文 献

- [1] Oliver C and Quegan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images. Boston, London, Artech House, 1998: 277-296.
- [2] Himonas S D and Barkat M. Automatic censored CFAR detection for nonhomogeneous environments. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1992, 28(1): 286-304.
- [3] Smith M E and Varshney P K. Intelligent CFAR processor based on data variability. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(3): 837-847.
- [4] Farrouki A and Barkat M. Automatic censoring CFAR detector based on ordered data variability for nonhomogeneous environments. *IEE Proceedings of Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(1): 43-51.
- [5] Hou Xiu-Ying, Morinaga N, and Namekawa T. Direct evaluation of radar detection probabilities. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1987, 23(4): 418-423.
- [6] Novak L M, Halversen S D and Owirka G J, et al. Effects of polarization and resolution on SAR ATR. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, 33(1): 102-116.
- [7] Rohling H. Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1983, 19(4): 608-621.

李 禹: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为超宽带雷达信号处理、遥感信息处理。

计科锋: 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为遥感信息处理、SAR 图像解译。

粟 毅: 男, 1961 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为超宽带雷达系统、信号与信息处理、遥感信息处理。