

基于位置相关的 SAR 图像中分布式目标检测

方学立 梁甸农 董臻

(国防科技大学电子科学与工程学院综合电子信息研究所 长沙 410073)

摘要 在研究了 SAR 图像中分布式目标在其所占有的各分辨单元间的二维位置相关信息的基础上,提出了一种 SAR 图像中分布目标的检测方法。根据二维情形下的不同距离定义,提出了算法的几种形式。计算机仿真结果、处理真实 SAR 图像数据的试验结果和性能分析表明了该方法比经典的恒虚警检测算法更有效、更优越。通过比较不同的距离定义下检测算法的性能和运算复杂度,得出了最优的距离定义形式。

关键词 合成孔径雷达, 分布式目标, 检测

中图分类号: TN958, TN957.52 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)02-0350-04

Distributed Targets Detection in SAR Image Based on Position Correlation

Fang Xue-li Liang Dian-nong Dong Zhen

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

Abstract Based on the study of the 2-dimensional position correlation information among resolution cells of a distributed target, a new method for distributed targets detection in SAR image is proposed. Several forms of the method based on different range measure definitions are proposed and compared with the CFAR detection by simulation and experiment, the results and performance analysis show the validity and advantage of the proposed method. By comparing the detection performance and computation complexity of the three range measure definitions with each other, the optimal one is determined.

Key words SAR, Distributed target, Detection

1 引言

在高分辨合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)图像中,每个目标都将占有多个分辨单元而成为扩展的面目标,因此在高分辨SAR图像中进行目标检测应当将目标视为分布式目标,传统上常规雷达下的点目标假设不再适用。SAR图像中目标检测的一种典型方法是基于高斯分布的双参数恒虚警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)检测^[1],其基本公式为

$$\left[\frac{(x - \hat{x})}{\hat{\sigma}} \right] > K_{\text{CFAR}} \quad (1)$$

其中 x 是检测单元, \hat{x} 是检测单元周围(背景)的均值, $\hat{\sigma}$ 是检测单元背景的标准差, K_{CFAR} 是由给定的虚警概率算出的阈值。考虑到SAR图像中目标的分布式特性,在设计检测算法时要设立警戒区域(如图 1 所示),以正确估计 \hat{x} 和 $\hat{\sigma}$ 。显

然式(1)中表示的检测算法假定了杂波服从高斯分布。由于 SAR 所照射场景和工作参数的变化,检测背景的统计特性也经常用对数正态、韦布尔、K 分布^[2]和 $S \alpha S$ ^[3]等复杂统计模型来描述。在与实际背景相匹配的情况下,这些不同分布下的 CFAR 检测能适应不同杂波情况下的目标检测且具有较好的检测性能。然而,实际中检测单元背景提供的杂波样本点往往很少,难以实现对杂波模型参数的精确估计。也有学者用具不同协方差和概率密度函数的球不变随机向量(Spherically Invariant Random Vector, SIRV)对目标单元和背景进行建模,进而由广义似然比法进行 CFAR 检测^[4],但随着 SAR 工作场景的变化和待检测目标的不同,目标和背景 SIRV 的协方差和概率密度函数不可能总可以事先获得。此外,CFAR 检测算法的性能对信杂比很敏感,在信杂比很低时,检测性能会大为下降。

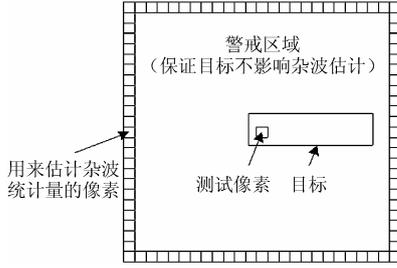


图1 通过设立警戒区域的CFAR分布式目标检测方法示意

本文将借助 SAR 图像中分布式目标的各分辨单元间的位置相关信息,运用双门限,提出一种新的 SAR 图像中分布式目标检测方法。应当指出的是,文献[5,6]运用位置相关信息成功地实现了对一维距离向高分辨雷达中沿距离向扩展目标的检测。

本文内容安排如下:第2节给出算法的模型、求解方法和实现流程图;第3节给出该方法用于 SAR 图像中分布式目标检测的仿真结果,并通过与 CFAR 检测算法相比较而进行性能分析;第4节是用本方法处理实际 SAR 图像数据的试验结果;第5节是本文的结论。

2 算法描述和实现方法

基于位置相关信息的分布式目标检测可通过双门限检测完成。第一门限检测用于将信号的幅度值量化成 0/1 二进制值,并将值为 1 的像素点的位置记录下来,第二门限检测运用位置相关信息从第一门限检测的结果中找到真正的分布式目标。

设 SAR 图像为 $N_R \times N_A$ (距离向为 N_R 点,方位向为 N_A 点) 维的矩阵 $\mathbf{X}_{N_R \times N_A}$, 则第一门限 T_{h1} 可设为

$$T_{h1} = \eta x_{\max} \quad (2)$$

其中 $x_{\max} = \max_{j=1}^{N_A} \left\{ \max_{i=1}^{N_R} \{x_{ij}\} \right\}$, $\eta \in (0,1)$ 为确信系数,可根据信杂比(SCR)和虚警概率来确定^[5,6]。作为粗检测门限,应当使检测概率尽量高,可容忍存在较高的虚警。

将 $\mathbf{X}_{N_R \times N_A}$ 与门限 T_{h1} 进行比较并记录超过门限的样本位置序号,记为

$$I = \arg\{x_{ij} \geq T_{h1}\} = \{i_1, i_2, \dots, i_K\} \subset \{1, 2, \dots, N_R \times N_A\} \quad (3)$$

其中 $\arg\{\cdot\}$ 表示取变元运算, I 表示第一门限检测到的样本位置信息集合。为方便起见,分别用 $i_{R1}, i_{R2}, \dots, i_{RK}$ 表示距离向坐标, $i_{A1}, i_{A2}, \dots, i_{AK}$ 表示方位向坐标。于是式(3)可写为

$$I = \arg\{x_{ij} \geq T_{h1}\} = \{[i_{R1}, i_{A1}], [i_{R2}, i_{A2}], \dots, [i_{RK}, i_{AK}]\} \quad (4)$$

即 $i_k = [i_{Rk}, i_{Ak}]$, $k = 1, 2, \dots, N_R \times N_A$ 。

根据式(4)可以定义被检测出的不同散射单元之间的相对距离为

$$r(j, k) = \|i_j - i_k\|, \quad k > j, j = 1, 2, \dots, K-1 \quad (5)$$

上式表示第一门限检测到的第 j 个散射单元到第 k 个散射单元的相对距离,它反映了经第一门限检测后各目标像素点之间的位置关系。其中, $\|\cdot\|$ 表示范数,可以根据范数定义的不同得出不同的距离定义,最常见的为城区距离、欧几里得距离和棋盘距离,分别为

$$r_1(j, k) = \|i_j - i_k\| = |i_{Rk} - i_{Rj}| + |i_{Ak} - i_{Aj}| \quad (6)$$

$$r_2(j, k) = \|i_j - i_k\| = \sqrt{(i_{Rk} - i_{Rj})^2 + (i_{Ak} - i_{Aj})^2} \quad (7)$$

$$r_3(j, k) = \|i_j - i_k\| = \max(|i_{Rk} - i_{Rj}|, |i_{Ak} - i_{Aj}|) \quad (8)$$

当独立考虑距离向和方位向时,可将距离定义为

$$r_4(j, k) = (|i_{Rk} - i_{Rj}|, |i_{Ak} - i_{Aj}|) \quad (9)$$

式(9)与式(6)–(8)的区别在于,其所表示的 $r(j, k)$ 是二维数组,在后续的第二门限检测时需要采用不同的方法,下文将有详细论述。

在 SAR 图像中,一个分布式目标占有多个分辨单元,设为 \mathbf{M}_0 (\mathbf{M}_0 包含两个元素 (M_{0R}, M_{0A}) , 分别表示目标在距离向和方位向的尺寸), $M_{0R} \times M_{0A}$ 即是参考窗所包含的像素点个数,其大小与待检测目标的尺寸有关。设待检测目标的尺寸为 $S_R \times S_A$, 雷达分辨率为 $\Delta R \times \Delta A$, 则

$$M_{0R} \times M_{0A} = \frac{S_R}{\Delta R} \times \frac{S_A}{\Delta A}。$$

对于一个分布式目标,在经过第一门限检测后应当至少有 M 个散射点被检测出来, M 便可作为第二检测门限 T_{h2} , 可设

$$T_{h2} = M = \mu M_{0R} \times M_{0A} \quad (10)$$

其中 $\mu \in (0,1)$ 为确信系数,没有确切求取表达式,可根据雷达回波数据经验地确定。 μ 大小的选取相当于改变了第二检测门限,因此会直接影响最终检测结果的检测概率和虚警概率,在本文的第3节将有讨论。

分布式目标的大小 T_S 可定义为

$$T_S = r(\mathbf{M}_0, (0,0)) \quad (11)$$

上式表示参考窗大小对应的坐标到坐标(0,0)点的距离,该距离依据距离定义的不同形式定义了相应的目标大小。因此,和式(6)–式(9)相对应的目标大小 T_S 分别为

$$T_{S1} = |M_{0R}| + |M_{0A}| \quad (12)$$

$$T_{S2} = \sqrt{M_{0R}^2 + M_{0A}^2} \quad (13)$$

$$T_{S3} = \max(|M_{0R}|, |M_{0A}|) \quad (14)$$

$$T_{S4} = (|M_{0R}|, |M_{0A}|) \quad (15)$$

通过参考窗 M_0 的大小和式(5)可以计算出各目标参考窗中的散射点个数(记为 u)和参考窗的位置(即目标位置),具体算法步骤如图2所示。

于是第二门限检测如下进行:

$$\left. \begin{aligned} u \geq T_{h2}, & \text{ 判为目标} \\ u < T_{h2}, & \text{ 不是目标} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

由于在式(9)定义下 $r(T_{\text{Position}}, i_k)$ 与 T_S 都是二维数组,因此在图2所示的算法中进行“ $r(T_{\text{Position}}, i_k) > T_S$ ”判别时,需要对其输出作一个定义。设 $T_{S4} = (T_{S4R}, T_{S4A})$ $r_4(T_{\text{Position}}, i_k) = (r_{4R}, r_{4A})$, 则“ $r_4(T_{\text{Position}}, i_k) > T_{S4}$ ”的输出定为:

$$r_4(T_{\text{Position}}, i_k) > T_{S4} = \begin{cases} 1, & \text{其它} \\ 0, & r_{4R} \leq T_{S4R} \text{ 且 } r_{4A} \leq T_{S4A} \end{cases} \quad (17)$$

至此,可以设计出基于二维位置信息相关的联合检测算法实现框图如图3所示。

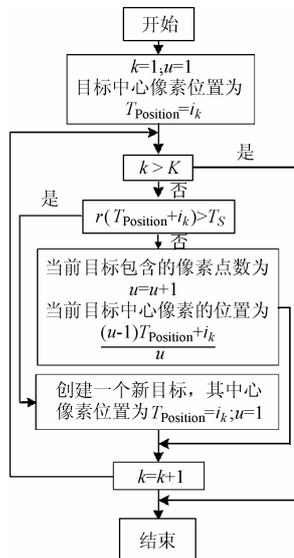


图2 u 和目标位置的计算步骤

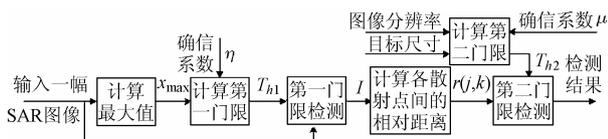


图3 双门限法检测 SAR 图像中分布式目标的实现框图

3 仿真结果与性能比较分析

为验证本文所提出方法对 SAR 图像中分布式目标检测的有效性并对各种距离定义下的相对性能进行分析,仿真若干幅包含一些分布式目标的 SAR 图像,分别用本文所提出的方法和 CFAR 算法进行检测并对所得出的结果进行对比分析。

图4是仿真的原始图像,其中包含均匀分布的100个分布式目标。图像仿真参数为:场景大小为 200m×200m,图像分辨率为 0.5m×0.5m,设定目标个数为 100(10×10)个,杂波模型为 K-分布,目标起伏模型为瑞利分布,信杂比为 -3dB。图5是一次检测结果显示。

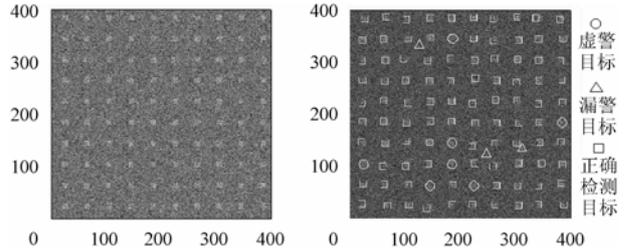


图4 仿真的某一幅图像 图5 一次检测结果显示

图6和图7给出了几种方法的检测性能曲线,其中分别包含本文方法下的4种距离定义、基于K-分布和Gauss分布的CFAR检测^[7]性能结果,说明如下:

(1)由于输入图像的信杂比很低(-3dB),所以 CFAR 检测结果较差。基于 Gauss 分布的 CFAR 检测性能最差,因为其杂波模型是失配的,基于 K-分布的 CFAR 检测性能虽然有明显提高,却仍差于本文所提出的几种方法,表明本文所提出的方法是一种更有效的 SAR 图像中的分布式目标检测算法。

式(2)由于基于式(8)、式(9)的距离定义下的检测性能远差于基于式(6)、式(7)的,在图7中给出了只基于距离定义式(6)、(7)的检测性能,可见,基于式(6)的距离定义下的检测性能比式(7)的稍差,但基于式(6)的距离定义运算量要远小于基于式(7)的。因此,实际中,选用式(6)的距离定义,即城区距离更合适。

(3)本文方法的检测性能曲线是在固定第一门限 $\eta = 0.40$ 时,让第二门限从高到低变化作出的。

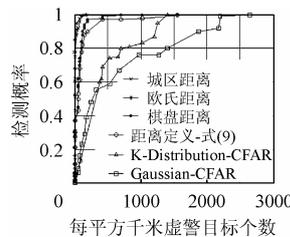


图6 几种检测方法的检测性能曲线

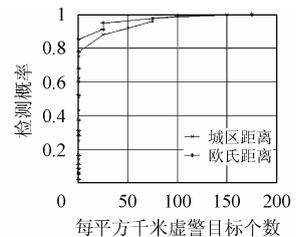


图7 两种典型距离定义下检测性能曲线

4 试验结果

第3节为了便于衡量基于位置相关的SAR图像中分布式目标检测方法的性能并与CFAR检测算法进行比较,采用了仿真数据。本节将通过处理一块真实的SAR图像来验证本文方法对实际SAR图像中分布式目标的检测能力。

图8(a)是一幅高分辨率SAR图像,其分辨率约为1m,图中包含6个人造目标。通过分析杂波的统计特性知道该块杂波服从K-分布,因此用基于K-分布的CFAR检测器来与本文方法进行比较。图8(b)是在虚警概率为 10^{-5} 下基于K-分布的CFAR检测的结果,可见,虽然虚警概率已经很低,但仍然有3个虚警,该虚警的产生是因为当前杂波是孤立的亮点,其幅度值很显著地强于其周围。图8(c)是本文方法的结果,可见其通过第二门限,有效地去除了孤立杂波造成的虚警,并将图像中的6个目标都检测出来。该组检测中,第一和第二门限确信系数分别为 $\eta = 0.40$, $\mu = 0.15$,距离定义采用城区距离。

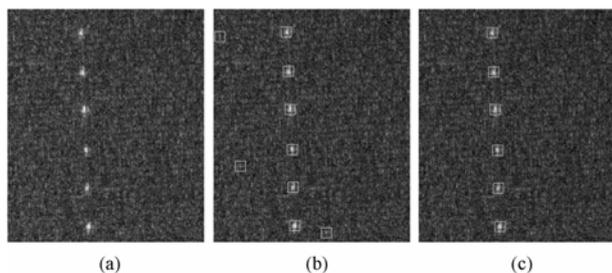


图8 一组处理真实CFAR图像数据的试验结果
(a)一幅真实ASR图像(b)K-分布CFAR检测结果
(c)本文方法检测结果

5 结束语

位置相关信息可以用于SAR图像中分布式目标的检测。在检测背景信息难以精确估计或者信杂比较低的情况下,本文方法比CFAR方法更能有效地实现高分辨SAR图像中的分布式目标检测。本文的结果已经成功运用于发现SAR图像中散焦的运动目标^[8],这对于运动目标成像是很重要的。

由于距离定义的多样性,导致基于位置相关的检测算法面临一个距离定义选择问题。从本文的仿真结果可以看出,城区距离从综合考虑算法运算量和检测性能两方面是最优的。

参考文献

- [1] Novak L M, Hesse S R. Optimal polarization for radar detection and recognition of targets in clutter[C]. IEEE, National Radar Conference, Lynnfield, MA, USA, 1993: 79 – 83.
- [2] Kuttikkad S, Chhappa R. Non-Gaussian CFAR techniques for target detection in high resolution SAR images[C]. IEEE, International Radar Conference, Austin, TX, USA, 1994: 910 – 914.
- [3] Kapoor R, Banerjee A, Tsihrantzis G A, et al.. UWB radar detection of target in foliage using alpha-stable clutter models[J]. *IEEE Trans on AES*, 1999, 35(3): 819 – 833.
- [4] Gerlach K. Spatially distributed target detection in non-Gaussian clutter[J]. *IEEE Trans. on AES*, 1999, 35(3): 926 – 934.
- [5] 黄德双, 韩月秋. 基于位置相关的高分辨雷达目标检测方法[J]. *电子科学学刊*, 1997, 19(5): 584-590.
- [6] 黄德双. 高分辨雷达智能信号处理技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 43 – 60.
- [7] 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: 199 – 220.
- [8] 郭汉伟. 合成孔径雷达地面运动目标检测与成像技术研究[D]. [博士学位], 长沙: 国防科技大学, 2003: 24 – 28.

方学立: 男, 1976年生, 博士生, 研究方向为图像中的目标检测。
梁甸农: 男, 1936年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为自适应信号处理、雷达信号处理、空间信息获取与处理等。
董臻: 男, 1973年生, 副教授, 主要研究方向为雷达信号处理、空间信息获取与处理等。