

SAR 图像目标的融合检测方法

张琦 高贵 匡纲要

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要 该文提出了一种利用扩展分形特征和局部对比度特征进行融合的 SAR 图像目标检测方法。分析了扩展分形特征的尺度敏感性及其在不同目标杂波模型下的二阶统计特性, 分析表明扩展分形特征在目标检测中存在负值效应, 即在正确检测出目标的同时把一些与目标具有相似形状而灰度值较低的区域也检测出来。而 CFAR 检测方法只利用了目标的局部对比度信息, 不存在负值效应, 但在强杂波环境中的检测结果存在很高的虚警。两种方法的融合可以滤除大量杂波虚警而保持目标。实测数据的融合检测结果证明了该方法的有效性。

关键词 合成孔径雷达, 扩展分形, 目标检测, 恒虚警率

中图分类号: TN958, TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)10-1802-04

A Fusion Method for Target Detection in SAR Image

Zhang Qi Gao Gui Kuang Gang-yao

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

Abstract A method fused by Extended Fractal (EF) feature and local contract feature is proposed for target detection in SAR image. The paper mainly discussed the size sensitivity behavior for the EF feature and the second-order statistics for the EF feature in various target/clutter models, and concluded that the feature is also invariant to negative scalar multiplication of the image in the sense that a deep target-sized shadow can also be detected as well as bright target-sized objects. While the CFAR method only using the local contract information is not symmetric, it has a high false alarm in the strong clutter environment. Fusion of the two features provides an even lower false alarm rate when the targets can be detected. Experiments with real data show the effective of the fusion method.

Key words Synthesis Aperture Radar (SAR), Extended fractal, Target detection, CFAR

1 引言

SAR系统的不断发展与完善, 使得其在民用和军事领域都得到了广泛的应用, 并已经获得了大量的数据。如何对这些SAR图像进行实时快速的解译已成为近年来国际学术界研究的热门课题之一。目前, 已有的目标检测方法主要是各种基于统计模型的CFAR类检测器^[1]以及各种基于非统计模型的检测器。然而, 前者在满足快速检测的同时存在着很高的虚警, 后者虽能降低虚警率但同时大大降低了检测速度。由于各种检测器存在不同的弊端, 因而迫切需要研究一种更实用的目标检测方法来代替。

到目前为止, CFAR方法因其快速的检测能力而被广泛应用。但是对于目标所处的实际地物场景而言, 往往含有很强的杂波, 应用CFAR方法会产生很高的虚警。基于扩展分形(Extended Fractal, EF)特征的目标检测方法能够弥补CFAR的不足, 能够在含有强杂波的SAR图像中有效地检测出目标。但由于EF特征计算公式的对称特性, 对于目标尺度大小的负值阴影也会产生较大的分形值, 因此又给检测带来了新的虚警。而这类虚警恰恰是CFAR检测方法不可能产生的。本文主要分析了EF特征的尺度敏感性以及不同的目标杂波

模型下EF特征的二阶统计特性, 进而采取融合EF特征和局部对比度特征对目标进行检测。实验表明, 使用两种特征融合的检测方法, 在保证检测概率地同时大大地降低了虚警率。

2 扩展分形特征

分形学创始人Mandelbrot最先应用分数布朗运动(Fractional Brownian motion)模型和Hurst指数定量描述自然形态的差异^[2]。扩展分形特征是一个局部统计量, 它是由计算图像点位置上多尺度的Hurst指数派生而来的。利用EF特征可以量化在不同尺度下图像表征出来的纹理粗糙程度, 并通过对图像的纹理粗糙程度的度量来检测目标的存在与否。

2.1 定义

给定一幅图像 $I[m, n]$, 其 x 方向和 y 方向的EF特征是分别对 x 方向和 y 方向的图像数值延迟 2Δ 后求增量平方均值与延迟 4Δ 后求增量平方均值的对数比。其表达式为

$$\begin{aligned} F^x[m, n] &= \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{f_{\Delta}^x[m, n]}{f_{2\Delta}^x[m, n]} \right) \\ F^y[m, n] &= \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{f_{\Delta}^y[m, n]}{f_{2\Delta}^y[m, n]} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 f^x 和 f^y 分别为 x 方向和 y 方向的结构函数:

$$\left. \begin{aligned} f_{\Delta}^x[m,n] &= \sum_{i=-w}^w \sum_{j=-w}^w |I[m+\Delta+i,n+j]-I[m-\Delta+i,n+j]|^2 \\ f_{\Delta}^y[m,n] &= \sum_{i=-w}^w \sum_{j=-w}^w |I[m+i,n+\Delta+j]-I[m+i,n-\Delta+j]|^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

EF 特征计算中隐含滑动窗口为 $W \times W$, 其中 $W = 2w + 1$ 。滑动窗口大小与最小延迟尺度的关系为

$$\Delta_{\min} = \frac{W-1}{4} \quad (3)$$

可以将 EF 特征简单地表示为

$$F[m,n] = (F^x[m,n] + F^y[m,n]) / 2 \quad (4)$$

对于目标尺寸为 $S \times S$ 的方形目标, 目标尺寸与最小延迟尺度应大致满足以下关系:

$$S = 2\Delta - 1 \quad (5)$$

由式(1)~式(5), 可以计算出不同尺寸的滑动窗口 W 下的 EF 特征图像, 再根据待测目标与自然杂波的固有分形维数差异, 通过设置一定的门限来进行目标检测。

式(5)是满足在含有目标的图像点上求得的 EF 特征值最大的条件下得到的。EF 特征具有尺度敏感性, 当目标尺度与滑窗大小满足最优关系时, 产生的 EF 特征值最大。下面通过实验得出目标尺度与滑窗大小的关系。

2.2 尺度敏感性

采用大小为 $S \times S$ 的方形目标来讨论 EF 特征的尺度敏感性。假设背景噪声为 0, S 是奇数为的是保证目标是中心对称的。图像的数学表达式为

$$T[m,n] = \begin{cases} 1, & |m|, |n| \leq (S-1)/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

如图 1 所示, 计算了 $S = 1, 5, 7, 11, 15$ 时 x 方向的 EF 特征值, 因为目标是中心对称的, 所以 y 方向的值与 x 方向的值是相等的。取 $W = 17$, 由式(3)可得出 $\Delta = 4$ 。

图 1 中第 1 列是不同大小的目标的原始图像, 第 2 列是 x 方向的步长为 8 的能量图, 第 3 列是 x 方向的步长为 16 的能量图, 第 4 列则是求得的 EF 特征值。假设图像中心坐标为 $[0, 0]$, 可以看出, 对于小目标的情况, 当步长为 8 时, 物体能量的中心点位置在 $[-4, 0]$ 和 $[4, 0]$, 窗口内的能量为原目标能量的两倍; 同样, 当步长为 16 时, 物体能量的中心点位置在 $[-8, 0]$ 和 $[8, 0]$, 恰好在窗口的边缘上, 结果仅有一部分能量落在窗内, 但滑窗内的能量仍然比原目标的能量要大。因此, 对于小目标的情况, EF 值随着 S 的增大而增长。当 S 增大到滑窗尺寸的一半, 即 $S = 7$ 时, 步长为 8 的能量图中窗口内的能量将达到最大。随着 S 的进一步增大, 步长为 8 的窗口内的能量将会减小; 而步长为 16 的窗口内的能量还将继续增大, 直到 $S > 17$ 时才会开始减小。图 1 中第 4 列给出了图像中心点的 EF 特征值, 可以看到, 当 $S = 7$ 时, EF 值达到最大, 由此可以得到目标尺寸 S 和滑窗尺寸 W 的最优关系为

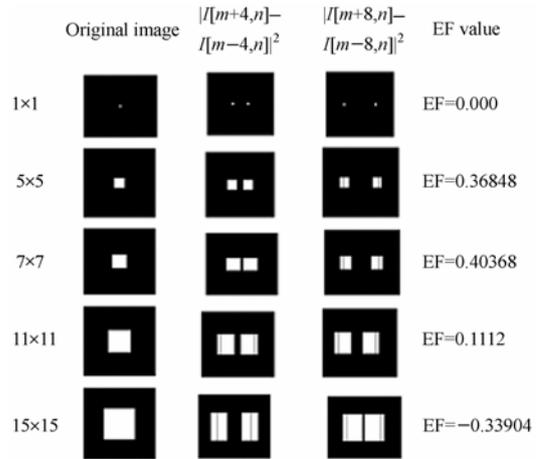


图 1 不同尺寸的方形目标的 EF 值图
Fig.1 Illustration for computation of EF feature of square objects of various sizes

$$S = W - 3/2 \quad (7)$$

在实际的目标检测中, 目标的尺度信息是已知的, 由式(7)确定 W 的取值进而计算 EF 特征值。这样图像中的目标与与目标尺度相近的物体将会产生较大的 EF 特征值, 而大于或小于目标尺度的物体产生的 EF 特征值较小。然后通过设置合适的门限进行检测。

2.3 目标/杂波模型分析

EF 特征的尺度敏感性实验是在无噪声条件下进行的。事实上, 任何 SAR 图像的噪声都不可能为 0。在这一部分, 选用了两个有代表性的目标杂波模型, 通过计算它们的 EF 特征的二阶统计量来讨论 EF 特征的特性。

(1)脉冲模型 选择滑窗大小 $W = 61$, 由式(6)得到不同大小的目标模型。在无噪声环境下, 当目标大小 $S = 29$ 时, EF 特征值将达到最大。图 2 描述了不同大小的方形目标在不同信噪比下的 EF 特征的均值和方差。

由图 2(a)可知, 信噪比一定时, EF 特征的均值在 $S = 29$ 处达到峰值; S 一定时, EF 特征的均值随着信噪比的增大而增大。由图 2(b)可知, S 一定时, EF 特征的方差随着信噪比的增大而减小。可以看出, 当信噪比为 10dB 时, 均值曲线比较尖锐, 方差值也很小, 此时, EF 特征能够将 $S = 29$ 的目标与大于或小于目标尺寸的物体区分开。

(2)真实目标模型 用真实的目标杂波模型来代替方形

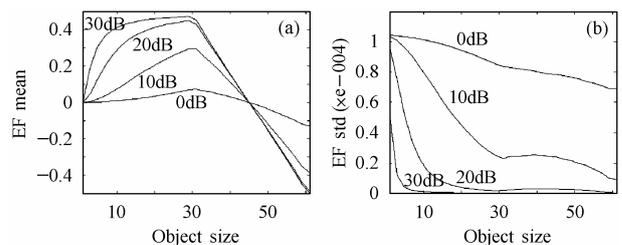


图 2 不同信噪比下不同大小方形目标的 EF 特性(a)EF 均值图 (b) EF 方差图

Fig2 The EF feature of square objects of various sizes at various SNRs

(a) Mean (b) Standard deviation

目标模型。如图 3(a)所示为一车辆目标的切片图，将其植入到高斯白噪声环境中，计算不同信噪比下该目标 EF 特征的均值。实际的目标杂波模型都是乘性噪声模型，为了处理的方便，采用加性噪声模型。图 3(b)给出了不同信噪比下车辆目标中心点 EF 特征的均值。随着信噪比的增大，均值不断的增大最终趋于一个定值。

通过上面两个实验对 EF 特征二阶统计特性的分析可得，EF 特征同时对目标的尺度和对比度都敏感。而 CFAR 检测方法仅仅利用了目标的局部对比度特征。EF 特征检测方法能够滤除掉 CFAR 检测没法滤除的诸如由建筑物边缘产生的亮点，减少了虚警。但是由于 EF 特征计算表达式的对称性，对于目标尺度大小的负值阴影也会产生较大的 EF 特征值。也就是说，如果将式(6)中的目标值改为 -1，将得到与原来相同的结果。因此又给检测带来了新的虚警。而这种虚警恰恰是 CFAR 检测方法可以避免的。这样，利用扩展分形特征和局部对比度特征融合的检测方法，同时抑制了 EF 特征检测和 CFAR 检测的缺陷，保证检测概率的同时降低了虚警率。

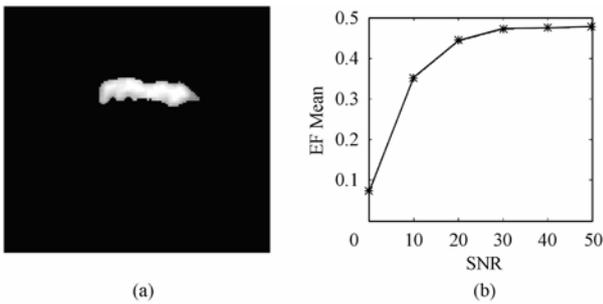


图 3 (a)真实目标切片 (b)不同信噪比下的 EF 特征均值
Fig 3 (a) A chip of real object (b)The EF value at various SNRs

3 扩展分形特征和局部对比度特征的融合

图 4 给出了采用两种特征进行融合的方案：同时对图像进行局部对比度特征提取和 EF 特征提取，对这两种特征信息进行融合，在判决层进行判决。根据融合方案，分别对两幅 SAR 图像进行了处理。

图 5(a)所示为一幅 MSTAR 图像，图中包含 12 个同类型的坦克目标。图 5(b)所示，是使用 EF 算法检测的结果。图中方形区域表示的是目标，圆形区域是虚警。可以看出有 4 个灰度值较低的，而大小与目标近似的区域块也被检测到，这是由负值效应引起的。图 5(c)所示是使用 CFAR 检测的结果，图中一些与目标灰度值相近的强杂波点也被检测到。图 5(d)所示就是采用两种方法融合所得到的结果，可以看出，虚警的个数较前面两种检测方法明显减少了。

图 6(a)为一幅 X 波段，分辨率为 0.5m 北京某地的机载 SAR 图像，图中含有 13 个不同类型的车辆目标，具体包括坦克，装甲车，油罐车和卡车等目标。图像大小为 3542×2731，对其进行 EF 特征检测，CFAR 检测以及采用

融合的方法进行检测的结果分别如图 6(b), 6(c), 6(e)所示。

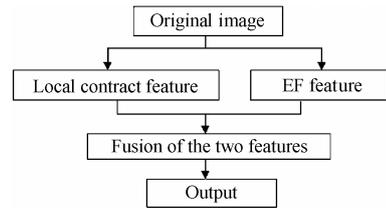


图 4 CFAR 检测和 EF 特征检测的融合
Fig 4 Fusion of the CFAR detection and EF feature detection

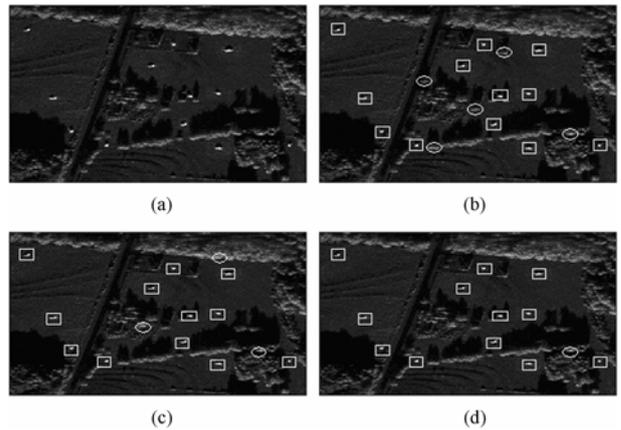


图 5 (a)原图 (b)EF 特征检测结果 (c)CFAR 检测结果
(d)两种方法融合
Fig.5 (a) Original image (b) Detection using EF feature
(c) Detection using CFAR (d)Detection using fused statistics

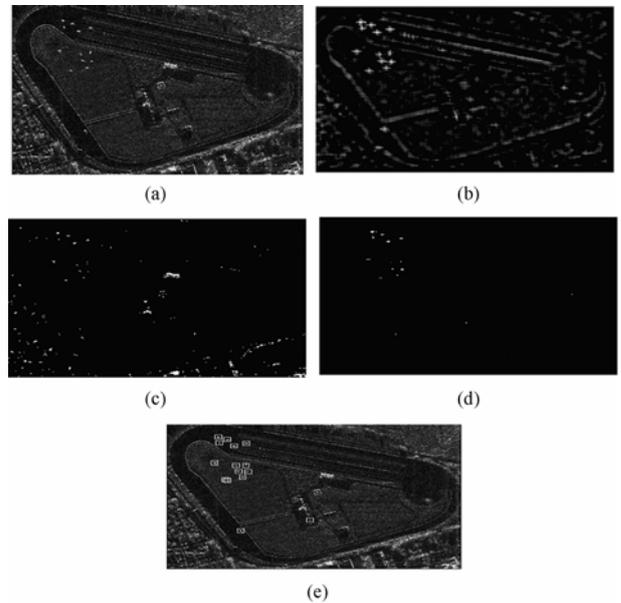


图 6 (a)原始图像 (b)EF 特征值图 (c)CFAR 检测图
(d)EF 特征提取图 (e)两种方法融合结果图
Fig.6 (a) Original image (b) EF value (c) Detection using CFAR
(d) Abstraction of EF feature (e) Detections using fused statistics

从上述两个实验可以看出：在非强杂波环境中(实验 1)，由于 EF 检测方法固有的缺陷，无法体现出 EF 方法比 CFAR 方法的优越性。而在强杂波环境中(实验 2)，采用 CFAR 检测方法能够正确地检测出目标，但虚警率很高，而采用 EF

特征检测方法大大降低了虚警率;相比之下,采用融合的方法能够同时抑制两种检测方法存在的弊端,使虚警率降得更低。具体的性能比较如表 1,表 2 所示。

表 1 图 5 中 3 种检测方法性能比较
Tab.1 Comparison of the performance of the three detection methods using in Fig.5

方 法	目标个数	检测概率(%)	虚警个数
CFAR	12	100	3
EF	12	100	5
融 合	12	100	1

表 2 图 6 中 3 种检测方法性能比较
Tab. 2 Comparison of the performance of the three detection methods using in Fig. 6

方 法	目标个数	检测概率(%)	虚警个数
CFAR	13	100	243
EF	13	100	2
融 合	13	100	1

4 结束语

EF 特征同时利用了目标的对比度特征和尺度特征,能在强杂波环境中有效地检测出目标。但由于 EF 特征固有的负值效应,使得它在正确检测出目标的同时把一些与目标具有相似形状而灰度值较低的区域也检测出来。而 CFAR 检测方法只利用了目标的局部对比度信息,在强杂波环境中的检测结果存在很高的虚警,但它可以避免 EF 特征由于负值效应引入的新的虚警。本文采用了扩展分形特征和局部对比度特征进行融合的方法,同时抑制了 EF 检测和 CFAR 检测两种方法存在的缺陷。实验表明,两种特征融合的方法比单独使

用其中任何一种检测方法取得的效果都好。

参 考 文 献

- [1] 何友,关键,彭应宁.雷达自动检测与恒虚警处理.北京:清华大学出版社,1999: 32 – 136.
- [2] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature. San Francisco: Freeman,1982.
- [3] Kaplan L M, Kuo C C J. Texture roughness analysis and synthesis via extended self-similar (ESS) model. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(11): 1043 – 1056.
- [4] Kaplan L M. Improved SAR target detection via extended fractal. *IEEE Trans. on AES*, 2001, 37(4): 436 – 451.
- [5] Novak L M, Halversen S D, Owirka G J, Hiatt M. Effects of polarization and resolution on SAR ATR. *IEEE Trans. on AES*, 1997, 33(1): 49 – 68.
- [6] Quoc H.Pham Timothy M Brosnan, Mark J T Smith. Multistage algorithm for detection of targets in SAR Image Data. *SPIE* 1997,Vol.3070,; 66 – 75.

张 琦: 女, 1981 年生, 硕士生, 研究方向为高分辨率 SAR 图像目标检测.

高 贵: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为基于 SAR 图像的自动目标识别、SAR 目标特征分析的工作.

匡纲要: 男, 1966 年生, 博士, 教授, 主要从事雷达信号处理、SAR 图像判读、多光谱图像目标识别、雷达目标特性分析等领域的研究工作. 在国内外学术刊物上发表 50 余篇学术论文.