

## 基于邻域统计分布变化分析的 UWB SAR 隐蔽目标变化检测

王广学\* 黄晓涛 周智敏

(国防科学技术大学电子科学与工程学院超宽带室 长沙 410073)

**摘 要:** 该文针对载机不同航迹条件下所得多时相 UWB SAR 图像灰度值存在较大起伏, 严重影响了基于像素灰度值差异的变化检测算法性能, 提出了一种基于邻域统计分布变化分析的 UWB SAR 隐蔽目标变化检测方法。该方法将 Gram-Charlier 展开理论同秩序滤波器相结合对多时相图像中每个像素邻域的统计分布进行估计, 进而借助 K-L 散度理论对多时相图像邻域统计分布变化进行定量分析以检测目标对应的变化区域。实验结果表明, 该文方法能够更好地适应不同航迹 UWB SAR 图像间灰度起伏的影响, 取得更好的检测结果。

**关键词:** 超宽带合成孔径雷达; 叶簇隐蔽目标检测; 变化检测; Gram-Charlier 展开; K-L 散度

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)01-0049-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00202

## UWB SAR Change Detection of Target in Foliage Based on Local Statistic Distribution Change Analysis

Wang Guang-xue Huang Xiao-tao Zhou Zhi-min

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

**Abstract:** Because of large pixel value change between multitemporal UWB SAR images caused by different imaging geometries, the performance of change detection algorithm based on pixel value difference declines quickly. In order to deal with this problem, a new UWB SAR foliage target change detection algorithm based on local statistic distribution is proposed. In the algorithm, the Gram-Charlier expansion theory and rank order filter are combined to estimate local statistic distribution. Then, the K-L divergence is used to measure the change between local statistic distribution of multitemporal UWB SAR image. And the target can be detected because of large K-L divergence value. Finally, the experimental results show that the algorithm can better deal with the pixel value change between multitemporal UWB SAR images with different imaging geometries and an obvious performance improvement on detection can be obtained.

**Key words:** Ultra-Wide Band SAR (UWB SAR); FOliage PENetration (FOPEN) detection; Change detection; Gram-Charlier expansion; K-L divergence

### 1 引言

超宽带合成孔径雷达 (Ultra-WideBand SAR, UWB SAR) 是一种工作于低频段(如 P 波段、UHF 波段、VHF 波段)的特殊信号体制合成孔径雷达, 由于其发射信号相对带宽很宽(信号带宽与中心频率之比大于 25%)因而简称为 UWB SAR<sup>[1]</sup>。与常规 SAR 相比, UWB SAR 由于发射信号位于低频区, 具有很强的叶簇穿透特性, 可对叶簇遮蔽下的隐蔽目标进行探测成像, 因而在军事侦察领域具有广泛的应用前景。然而, 大量的理论与实验数据表明<sup>[2-4]</sup>, 与常规 SAR 图像相比, 在实际 UWB SAR

图像中虽然叶簇回波被大大衰减, 但由于受粗大树干回波的影响, 在图像中除了存在车辆、坦克等战术目标, 还有许多类似目标的冲击亮点, 给基于 UWB SAR 图像的叶簇隐蔽目标检测带来了严重困难。

变化检测技术是一种利用同一地区多时相图像间差异性来实现检测的方法, 与常用的基于单幅图像目标检测技术相比, 变化检测技术由于进一步利用了同一地区不同时间图像背景的相关性, 具有更高的抑制强树干杂波的潜力, 因而在基于 UWB SAR 叶簇隐蔽目标检测中日益受到关注<sup>[2-7]</sup>。目前该领域的研究多集中于基于图像像素灰度值差异的变化检测方法, 如: 多极化比值法<sup>[3,4]</sup>、似然比法<sup>[5,6]</sup>、最小二乘差值法<sup>[7]</sup>。实验表明, 以上算法对于成像时载机航迹相同条件下所得多时相 UWB SAR 图像具

2010-03-09 收到, 2010-07-05 改回

教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0223), 国家自然科学基金(60972121)和国防科大科研项目(JC09-04-01)资助课题

\*通信作者: 王广学 wgxrada@163.com

有较好效果。

然而在实际应用中, 由于军事部署需要或客观条件的限制, 不同时相 UWB SAR 图像对应的成像航迹往往不同, 进而造成观测区域电磁波入射角的差异, 这将导致树林区域树木间的电磁耦合发生改变, 在时相 UWB SAR 图像中即表现为同一像素点的图像灰度值存在较大差异(此种差异较于环境变化, 相干斑噪声造成的变化更为明显), 从而严重影响基于像素灰度值差异分析的目标变化检测算法的性能。为此, 本文提出了一种基于邻域统计分布变化特征的隐蔽目标变化检测技术, 该方法在时相 UWB SAR 图像灰度值存在较大差异的前提下假设其背景区域的像素邻域统计分布特性变化较小, 而目标区域差异较大。在此基础上将 Gram-Charlier 展开理论<sup>[8,9]</sup>与秩序滤波器相结合, 对图像中每个像素邻域的统计分布进行估计, 并借助 K-L 散度理论对多时相图像间相同像素邻域统计分布的差异进行分析, 以检测目标对应的变化区域。实验结果表明, 本文方法相对于基于像素灰度值差异的变化检测算法能够更好地克服不同航迹 UWB SAR 图像间灰度值起伏的影响, 取得更佳检测结果。

本文的后续结构如下: 第 2 节为像素邻域统计分布特性估计, 将 Gram-Charlier 展开理论和秩序滤波预处理相结合对像素邻域统计分布进行估计; 第 3 节为像素邻域统计分布变化分析, 采用 K-L 散度理论对多时相 UWB SAR 图像间每个像素的邻域统计变化进行定量分析; 第 4 节为算法总结和实验验证; 最后为结论部分。

## 2 像素邻域统计分布估计

本文中将以某一像素为中心, 其附近像素组成的矩形区域称为此像素的邻域, 如图 1 所示。由于本文算法的思路在于通过比较同一像素邻域在时相图像中统计分布的变化大小以确定目标所在区域, 因此对像素邻域统计分布特性进行准确的估计是本文算法的基础。常用的直方图统计分布估计法由于无法得到统计分布的解析表达式, 不利于后文的统计分布变化分析, 因而难以适用。为此, 本文提出将秩序滤波预处理和 Gram-Charlier 展开式相结合的像素邻域统计分布估计方法, 以下首先介绍 Gram-Charlier 展开式的原理。

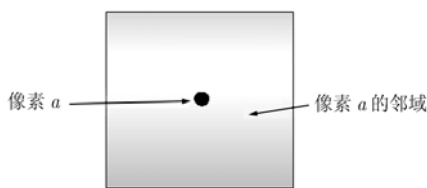


图 1 像素邻域

设随机变量  $x$  的概率密度函数为  $p(x)$ , 则由概率论知识可知其特征函数可表示为

$$g(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(x)e^{jwx} dx = 1 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(jw)^i}{i!} m_i(x) \quad (1)$$

对式(1)等号左右两边取对数即可得到其第二特征函数可表示为, 其中  $m_i$  为  $x$  的  $i$  阶矩

$$g'(w) = \lg(g(w)) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(jw)^i}{i!} c_i(x) \quad (2)$$

$c_i$  为  $x$  的  $i$  阶累计量, 设  $p_0(x)$  为与  $p(x)$  具有相同均值和方差的正态分布函数, 由正态分布的性质可知, 其第二特征函数可表示为

$$g'_0(w) = \lg(g_0(w)) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(jw)^i}{i!} c_i^0(x) = \sum_{i=1}^2 \frac{(jw)^i}{i!} c_i(x) \quad (3)$$

比较式(2), 式(3)可得

$$\begin{aligned} g(w) &= g_0(w) \exp\left\{\sum_{i=3}^{\infty} \frac{(jw)^i}{i!} c_i(x)\right\} \\ &= g_0(w) \left[1 + \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{l!} \left(\sum_{i=3}^{\infty} \frac{(jw)^i}{i!} c_i(x)\right)^l\right] \end{aligned} \quad (4)$$

将式(4)按照  $(jw)$  的幂进行整理并求逆傅里叶变换得

$$\begin{aligned} p(x) &= p_0(x)(1 + \phi(x)) \\ &= p_0(x) \left[1 + \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^M C_i H_i\left(\frac{x-u}{\sigma}\right)\right] \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)即为 Gram-Charlier 展开式<sup>[8]</sup>, 其中  $u$ 、 $\sigma$  分别为  $x$  的均值和方差,  $H_i(x)$  为  $i$  阶 Hermite 多项式,  $C_i$  为  $i$  阶累计量的函数。

$$\begin{aligned} C_1 &= 0, C_2 = 0, C_3 = \frac{c_3}{6\sigma^3}, C_4 = \frac{c_4}{24\sigma^4}, \\ C_5 &= \frac{c_5}{120\sigma^5}, C_6 = \frac{(c_6 + 10c_3^2)}{720\sigma^6} \dots \end{aligned} \quad (6)$$

由式(5)可知, 当  $C_i$  精确已知时, 只需增加  $M$ , 即可实现对分布函数的任意精度估计。然而在实际应用中,  $C_i$  需要由随机样本估计得到, 在样本数一定的条件下,  $C_i$  估计精度将会随着  $i$  的增加呈明显下降趋势, 从而限制了式(5)中分布函数估计精度的提高。图 2 所示即为  $M$  取不同值时, 利用式(5)对一个像素邻域的统计分布进行估计所得概率密度曲线。其中图 2(a)为邻域灰度图像, 邻域大小为  $50 \times 50$ , 图 2(b)-2(d)依次为  $M$  取 1, 4, 6 时的估计结果,  $M$  取 1 即对应于正态分布。

比较图 2(c), 2(d)可知, 当  $M$  由 4 增加到 6 时, 估计精度不仅未增加, 反而由于  $C_6$  中存在较大估计误差, 导致估计精度出现了下降。为了提高  $C_6$  的估计精度, 必须扩大实验中所用像素邻域尺寸, 然而随着像素邻域的扩大将会容易导致相邻目标的混

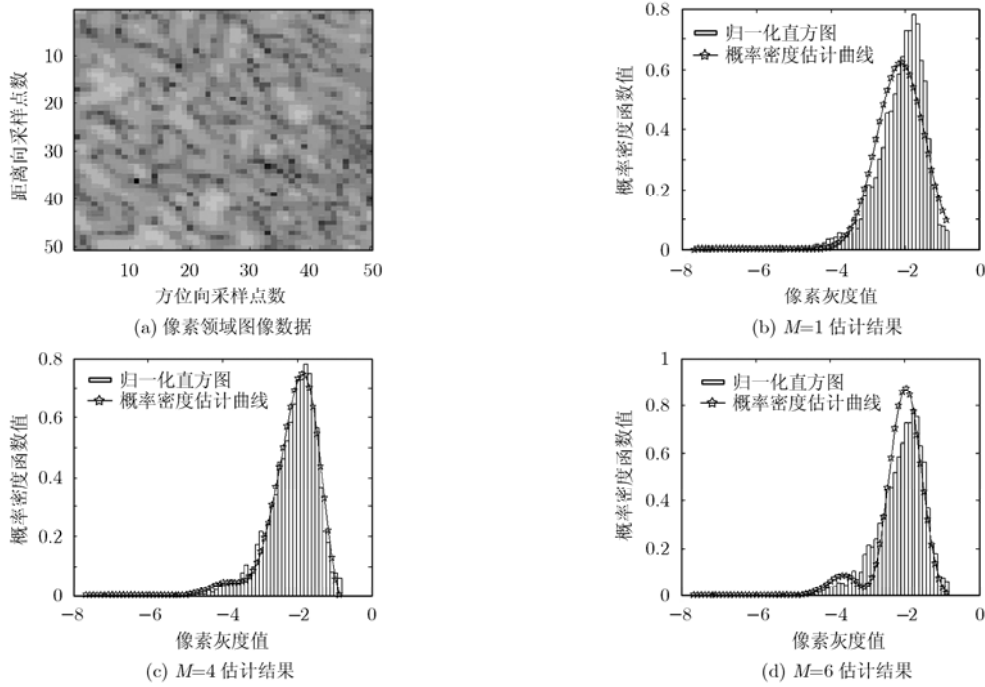


图 2 基于 Gram-Charlier 展开式的概率密度估计

叠，难以满足对隐蔽目标准确区分定位的要求。鉴于以上原因，在算法的实现过程中，本文首先根据场景中待检测目标尺寸将像素邻域的大小取为  $10 \times 10$  (与目标大小相接近)，并假设像素邻域的统计分布与高斯分布相近，在此基础上将  $M$  取为 4。需要指出的是邻域的大小并不能随目标的尺寸而无限减少，实验表明当邻域的大小取为  $5 \times 5$  时邻域统计分布的估计精度就会明显下降，从而导致检测性能明显下降。此外，由于受强树干杂波正值亮点噪声和树干间隙阴影区域负值暗点噪声的影响，实际树林区域 UWB SAR 图像中，许多像素邻域的统计分布与理想正态分布相比具有明显的拖尾特性，从而影响了上述方法的估计精度。为此本文借鉴文献[1]中基于中值滤波的 UWB SAR 叶簇区域图像杂波拖尾分布抑制思想，提出将秩序滤波预处理和 Gram-Charlier 展开相结合的像素邻域统计分布估计方法。预处理的目的在于利用秩序滤波对叶簇区域 UWB SAR 图像灰度分布的拖尾效应进行抑制，使其更加接近于正态分布，从而提高 Gram-Charlier 展开对概率密度估计的精度。预处理采用的秩序滤波器如式(7)所示。

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_R} a_i x_i \\ a_i &= \begin{cases} 1, & |x_i - me| \leq 2/3 \max_i |x_i - me| \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中  $x'$  为滤波器输出， $me$  为邻域像素灰度中值， $N_R$  邻域像素点数， $N_e$  邻域内为 1 的像素个数。此

种滤波器的优点在于可通过滤除偏离中值较大的点削弱像素邻域统计分布的拖尾特性，同时通过随机样本求平均使得最终输出更加接近于正态分布，从而提高像素邻域统计分布估计的精度，实验表明本文滤波器与中值秩序滤波器<sup>[1]</sup>相比具有更好的效果。

### 3 像素邻域统计分布变化分析

在完成像素邻域的统计分布特性估计的基础上，还需要对其在多时相图像中的变化特性进行定量分析。为此，在文中引入 K-L 散度理论，K-L 散度亦称相对熵，是概率统计领域用来表征两个统计分布差异的一种重要的统计测度，其定义如下式：

$$D(p_1, p_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_1(x) \lg \frac{p_1(x)}{p_2(x)} dx \quad (8)$$

需要注意的是，一般条件下，式(8)中概率分布函数  $p_1, p_2$  并不具有可互换性，即  $D(p_1, p_2) \neq D(p_2, p_1)$ ，在实际应用中本文采用式(9)作为衡量像素邻域统计分布大小的测度，由所有像素点的  $L$  值组成的图像即为变化测度图像，亦即检验统计量图像。

$$L(p_1, p_2) = \lg [D(p_1, p_2) + D(p_2, p_1)] \quad (9)$$

为了计算方便，以下对式(9)进行化简。记  $N_1, N_2$  分别为  $p_1, p_2$  对应的正态分布，则式(9)可记为

$$\begin{aligned} D(p_1, p_2) &= \int_{-\infty}^{+\infty} p_1(x) \lg \frac{p_1(x)}{N_1(x)} dx \\ &+ \int_{-\infty}^{+\infty} p_1(x) \lg \frac{N_1(x)}{N_2(x)} dx \\ &- \int_{-\infty}^{+\infty} p_1(x) \lg \frac{p_2(x)}{N_2(x)} dx \end{aligned} \quad (10)$$

利用式(3), 对式(10)进行近似可得

$$\begin{aligned}
 D(p_1, p_2) &\approx \int_{-\infty}^{+\infty} N_1(x)(1 + \phi_1(x)) \left( \phi_1(x) - \frac{\phi_1^2(x)}{2} \right) dx \\
 &\quad + \int_{-\infty}^{+\infty} N_1(x)(1 + \phi_1(x)) \lg \frac{N_1(x)}{N_2(x)} dx \\
 &\quad - \int_{-\infty}^{+\infty} N_1(x)(1 + \phi_1(x)) \left( \phi_2(x) - \frac{\phi_2^2(x)}{2} \right) dx \\
 &\approx \int_{-\infty}^{+\infty} N_1(x) \left( \varphi(x) - \frac{\varphi^2(x)}{2} \right) dx \\
 &\quad + \int_{-\infty}^{+\infty} N_1(x) \lg \frac{N_1(x)}{N_2(x)} dx \\
 &\quad + \int_{-\infty}^{+\infty} N_1(x) \phi_1(x) \lg \frac{N_1(x)}{N_2(x)} dx \quad (11)
 \end{aligned}$$

其中  $\varphi(x) = \phi_1(x) - \phi_2(x)$ , 记  $k_i, k'_i$  分别为  $\varphi(x), \varphi^2(x)$  中  $x$  的  $i$  次幂的系数,  $m'_i$  为正态分布  $N_1$  的  $i$  阶原点矩。则式(11)中右边第 1 项可记为

$$\int_{-\infty}^{+\infty} N_1(x) \left( \varphi(x) - \frac{\varphi^2(x)}{2} \right) dx = \sum_{i=0}^{2M} (k_i + k'_i) m'_i \quad (12)$$

记  $u_1, \sigma_1, u_2, \sigma_2$  分别为正态分布  $N_1, N_2$  对应的均值和方差, 则式(11)中右边第 2, 3 项分别可化简如下

$$\int_{-\infty}^{+\infty} N_1(x) \lg \frac{N_1(x)}{N_2(x)} dx = \frac{\sigma_1^2}{2\sigma_2^2} + \lg \frac{\sigma_2}{\sigma_1} - \frac{1}{2} + \frac{(u_1 - u_2)^2}{2\sigma_2^2} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 &\int_{-\infty}^{+\infty} N_1(x) \phi_1(x) \lg \frac{N_1(x)}{N_2(x)} dx \\
 &= \left( \lg \left( \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{u_2^2}{\sigma_2^2} + \frac{u_1^2}{\sigma_1^2} \right) \right) \sum_{i=0}^M l_i m'_i \\
 &\quad + \left( \frac{u_2}{\sigma_2} + \frac{u_1}{\sigma_1} \right) \sum_{i=0}^M l_i m'_{i+1} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sigma_2^2} - \frac{1}{\sigma_1^2} \right) \sum_{i=0}^M l_i m'_{i+2} \quad (14)
 \end{aligned}$$

其中  $l_i$  为  $\phi(x)$  中  $x$  的  $i$  次幂的系数。利用式(12)-式(14)多时相图像中每一个像素邻域的变化测度即可直接由邻域内像素灰度值的各阶样本矩经过简单计算得到。

#### 4 算法总结及实验验证

根据以上分析, 基于邻域统计分布变化分析进行目标变化检测的流程可概述如下:

(1) 图像配准 采用图像配准算法对多时相图像进行配准(由于所用实验数据已由瑞典 FOI 基于 GPS 导航数据进行了配准<sup>[10]</sup>, 因而文中对此部分不作详细阐述)。

(2) 秩序滤波 利用式(7)分别对多时相图像进行秩序滤波。

(3) 邻域统计分布变化特性分析 采用 Gram-

Charlier 展开式对多时相图像中每个像素的邻域统计分布进行估计, 并利用式(12)-式(14)计算同一像素邻域在不同时相图像统计分布的变化测度图像。

(4) 门限检测 对变化测度图像进行门限判决以确定目标所在区域, 由于所得变化测度图像统计分布较为复杂, 尚未找到合适的分布模型进行描述, 因而此处阈值选取采用人工试探法(manual trial and error<sup>[11]</sup>)。即首先求出变化测度图像的均值  $u_d$  和方差  $\sigma_d$ , 并通过人工比较分析参考图像和待检测图像在观测区域中找出一个无变化的子区域(区域内像素点数记为  $M_a$ , 为了保证域值的可靠性  $M_a$  应大于 10000), 使用域值序列  $T_n = u_d + 0.25n\sigma_d$  对所选无变化子区域的变化测度图像进行检测, 其中  $n$  为自然数并由 1 逐渐增加, 直到检测所得虚警像素点数小于等于  $M_f$ , 即虚警概率小于等于  $M_f/M_a$ , 此时的  $T_n$  即为所选阈值( $M_f$  可根据虚警概率确定)。

为了验证算法性能, 以下采用一组两时相 UWB SAR 图像数据对本文算法及其它相关算法进行验证及比较分析<sup>[10]</sup>。图 3(a), 图 3(b)所示为采用不同航迹对同一树林区域进行观测所得两幅 UWB SAR 图像(航向角分别为  $230^\circ, 225^\circ$ ), 且第 2 次观测时在树林中隐藏了 25 个车辆目标, 其具体位置如图 3(b) 圆圈所示, 其中位于上面两行的为 10 个小型车辆, 下面三行为 15 个大型车辆。观察图像可知, 由于 UWB SAR 的低频叶簇穿透特性, 两幅图像中的叶簇回波非常微弱, 隐蔽在叶簇下的车辆目标成功显现, 与此同时在常规 SAR 中由于叶簇遮盖无法探测到的粗大树干亦在图像中呈现出明亮的斑点, 给目标的检测带来了严重的困难, 并且由于航向角的不同两幅图像背景区域的灰度值亦存在明显的差异。

图 4 为采用瑞典 FOI 似然比法<sup>[5,6]</sup>所得检验统计量图像, 由图可见受两幅图像中背景区域的灰度值起伏的影响, 检验统计量图像中 10 个小型隐蔽车辆目标完全淹没在大量的强杂波干扰中。图 5 为不含秩序滤波时采用本文方法所得变化测度图像( $M = 4$ ), 由图可见受 UWB SAR 中杂波分布拖尾效应的影响, 邻域统计分布估计精度较低, 虽然个别目标得到增强, 但在背景区域亦出现量许多高亮杂波区。图 6 为包含秩序滤波时采用本文算法所得变化测度图像( $M = 4$ ), 由图可见不仅大型隐蔽目标能量明显高于杂波区域, 大部分小型隐蔽目标亦得到增强, 综合图 4-图 6 可知, 包含秩序滤波器时本文算法所得目标区域与背景区域的分离性最大。

图 7 所示为调整判决门限对图 4, 图 6 进行检测时目标虚警个数随目标检测个数的变化曲线, 显然包含秩序滤波器时本文算法的性能要明显优于

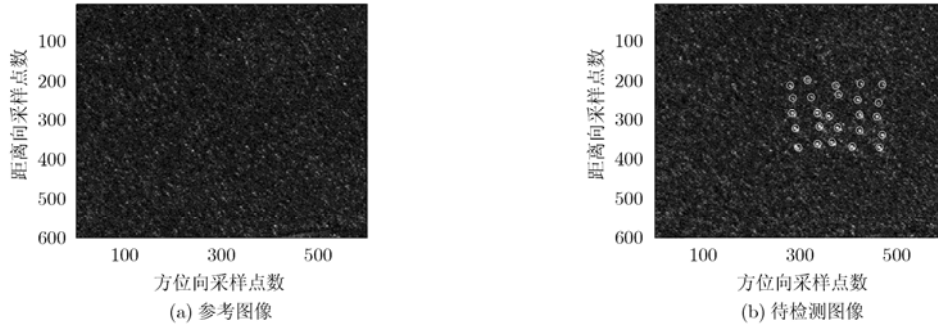


图 3 实验数据

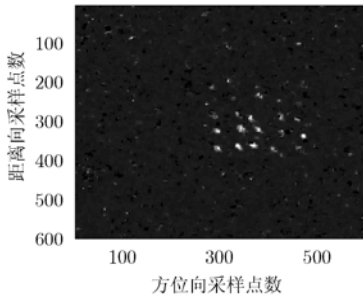


图 4 FOI 法似然比法检验统计量图像

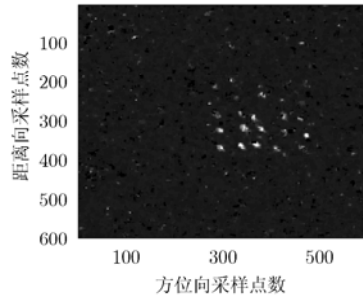


图 5 本文方法检验统计量图像(不含滤波  $M=4$ )

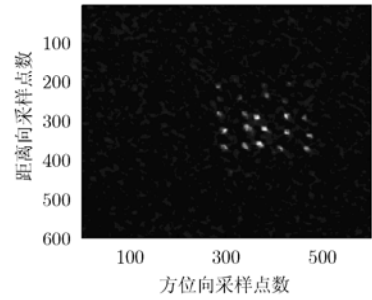


图 6 本文方法检验统计量图像(含滤波  $M=4$ )

FOI 算法。

为了进一步说明  $M$  对检测性能的影响，文中在上述实验的基础上，分别将  $M$  设为 1, 6 对图 3 进行了检测实验，图 8, 图 9 为所得的变化测度图像。由式(5)，式(6)可知  $M$  取为 1 等价于假设像素邻域服从理想正态分布，与实际情况不符，导致图 8 中检测性能明显降低。 $M$  取 6 时由于受所取像素邻域中样本容量的限制，式(6)中  $C_6$  的估计结果存在较大误差，从而导致像素邻域统计分布估计精度下降，最终导致图 9 中检测性能亦明显降低。

### 5 结束语

本文针对载机不同航迹条件下所得多时相 UWB SAR 图像灰度值存在较大起伏，基于像素灰度值差异变化检测算法难以取得满意的性能这一难点，提出了一种基于邻域统计分布变化分析的隐蔽

目标变化检测技术，该方法将秩序滤波与 Gram-Charlier 展开相结合对像素邻域的统计分布进行估计，进而利用 K-L 散度理论提取同一像素邻域统计分布在多时相图像间的变化信息，以确定目标所对应的变化区域，文中最后实验表明本文算法对于不同航迹条件下所得多时相 UWB SAR 图像的变化检测，较之基于像素灰度值差异变化检测算法，具有更优的性能。由 SAR 图像理论可知，与实图像相比复图像更加接近于正态分布，因而采用 Gram-Charlier 展开对复图像像素邻域统计分布进行估计可获得更为准确的结果，但由于复图像的像素值为复随机变量，其 K-L 散度的计算过程较为复杂，给目标检测带来了困难，为此我们将在后续的研究中进一步探索复随机分布 K-L 散度的简化算法，以期通过使用复图像进一步提高算法的检测性能。

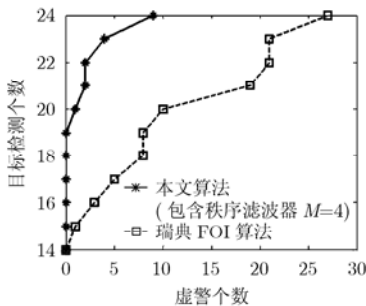


图 7 检测性能比较

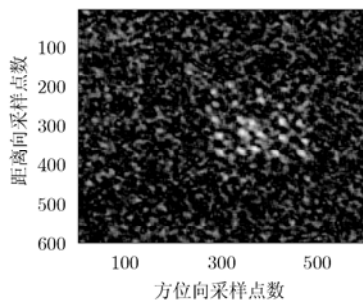


图 8 含秩序滤波器  $M=1$  检验统计量图像

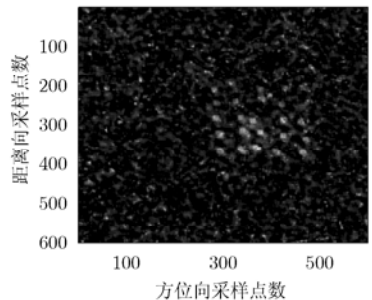


图 9 含秩序滤波器  $M=6$  检验统计量图像

## 参 考 文 献

- [1] 杨志国. 基于 ROI 的 UWB SAR 叶簇覆盖目标鉴别方法研究 [D]. [博士论文], 长沙: 国防科技大学, 2007: 17-23.
- [2] Ulander M H. Modeling of change detection in VHF- and UHF-band SAR [C]. EUSAR2008, Fridrichshafen, 2008, 2: 127-131.
- [3] Novak L. Target recognition and polarimetric SAR[R]. Tutorial of 2008 IEEE Radar Conference, Rome, 2008, Tutorial #13.
- [4] Novak L. Algorithms for SAR Change Detection, Compression and super-resolution[R]. Tutorial of 2009 International Radar Conference, 2009, Bordeaux, Tutorial #10.
- [5] Lundberg M, Ulander M H, Pierson E, and Gustavsson A. A challenge problem for detection of targets in foliage[C]. Conference on Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery, Orlando, 2006, SPIE 6237: 1-12.
- [6] Lundberg M, Ulander M H, Pierson E, and Gustavsson A. Change detection for low-frequency SAR ground surveillance[J]. *IEE Proceedings Radar sonar and navigation*, 2005, 152(6): 413-420.
- [7] 杨志国, 黄小涛, 周智敏. SAR 目标检测中的一种稳健变化检测算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(9): 2094-2098.
- [8] Cavalcante C C, Mota C M, and Romano M T. Polynomial expansion of the probability density function about gaussian mixtures [C]. IEEE Workshop on machine learning for signal processing, Sao Luis, 2004: 163-172.
- [9] Haykin S. Neural Network: A Comprehensive Foundation. 2nd Edition[M]. New Jersey: Prentice Hall, New Jersey, 1999: 566-567.
- [10] FOI. CARABAS-II VHF SAR data set[DB/OL], [Http://www.sdms.af.mil/datasets](http://www.sdms.af.mil/datasets), 2005.
- [11] Fung T and Ledrew E. The determination of optimal threshold levels for changes detection using various accuracy indices[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988, 54(10): 1449-1454.
- 王广学: 男, 1981 年生, 博士生, 从事 SAR 目标检测等领域的研究工作.
- 黄晓涛: 男, 1972 年生, 博士生导师, 教授, 从事 SAR 信号处理、阵列信号处理、谱分析等信号与信息系统领域的研究工作.
- 周智敏: 男, 1957 年生, 博士生导师, 教授, 从事 SAR 系统设计、高速实时信号处理等领域的研究工作.