

UWB SAR 叶簇隐蔽目标差值变化检测中杂波分布建模分析与应用

王广学^{1,2}, 黄晓涛², 周智敏²

(1. 空军预警学院, 湖北 武汉 430019; 2. 国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 由于树林观测区域后向散射强度具有快变特性, 现有方法无法对 UWB SAR 叶簇隐蔽目标差值变化检测的杂波分布进行准确建模分析。为此, 首先推导分析了均匀观测场景差值变化检测的杂波分布模型, 而后假设观测场景后向散射强度服从伽马分布, 在此基础上进一步推导了一种快起伏场景差值变化检测杂波分布模型。实验应用结果表明, 该分布模型可对树林区域差值变化检测的杂波分布进行准确建模分析, 从而提高变化检测性能。

关键词: 变化检测; 叶簇隐蔽目标检测; 超宽带合成孔径雷达; 杂波建模

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)02-0076-06

Analysis and application of clutter distribution modeling in UWB SAR difference change detection of target in foliage

WANG Guang-xue^{1,2}, HUANG Xiao-tao², ZHOU Zhi-min²

(1. Air force early Warning Academy, Wuhan 430019, China;

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

Abstract: In forest area, the intensity backscatter varies quickly. In UWB SAR foliage-concealed target difference change detection, this characteristic had made existing clutter models couldn't fit the clutter distribution accurately. To address the problem, the clutter model suitable for uniform scene was derived. After that, by assuming the intensity of forest area backscatter follows Gamma distribution, the clutter model suitable for serious non-stationary scene was established. And the experimental results showed that, in foliage-concealed target difference change detection, the proposed model could fit the clutter distribution more accurately, and an improved detection performance could be achieved.

Key words: change detection; foliage-concealed target detection; UWB SAR; clutter modeling

1 引言

超宽带合成孔径雷达 (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%)^[1]。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^[2-4], 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

收稿日期: 2010-10-25; 修回日期: 2011-12-25

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-07-0223); 国家自然科学基金资助项目 (60972121)

Foundation Items: The Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-07-0223); The National Natural Science Foundation of China (60972121)

利用了同一地区不同时间观测图像背景区域的相关性, 具有更高的抑制强树干杂波的潜力, 因而在 UWB SAR 叶簇隐蔽目标检测中日益受到关注^[5-8]。

目前在军事侦察领域, 常用的基于 SAR 图像的目标变化检测算法可分为: 比值法、似然比法和差值法。由于 UWB SAR 图像中叶簇后向散射非常弱, 因而在树干间隙存在大量的弱后向散射暗值区, 受成像几何及环境气候变化的影响, 这些区域在不同时刻 SAR 图像中的分布具有较大差异, 实验表明与其他 2 种方法相比, 比值变化检测对于此类变化更为敏感, 相应的虚警概率也更高^[9]。对于基于似然比的叶簇隐蔽目标变化检测, 瑞典的研究机构 FOI 基于 VHF 波段的 UWB SAR 幅度图像数据, 直接采用二维高斯分布(二维对数正态分布)对 2 次成像观测构成的二维观测矢量进行建模, 进而进行似然比变化检测, 取得了一定的效果^[10]。此种方法的缺点在于难以找到更加准确的模型对二维观测矢量进行建模, 因而限制了性能的进一步提高。对于差值变化检测, 典型的算法通常假设其杂波分布服从高斯分布, 并在此基础上进行目标检测^[11]。此外, 为了克服后向散射强度变化对检测性能的影响, 文献[12]在基于高波段 SAR 图像数据的差值变化检测中采用了后向散射强度归一化的方式进行处理, 即假设观测场景中每个小区域内后向散射强度相同, 在此基础上借助归一化的方式将整个观测场景的后向散射强度调整到近似相等, 从而提高算法的性能。然而上述方法中存在 2 个问题: ①由于 UWB SAR 树林观测区域后向散射强度呈现快起伏特性, 即强后向散射区与弱后向散射区交错存在, 难以满足小区域内后向散射强度相同的假设, 因此上述后向散射强度归一化的方法难以使用; ②即使对于均匀后向散射场景, 差值变化检测的杂波分布与高斯分布亦存在差异, 从而降低了目标检测的性能。

根据以上分析, 本文以观测区域后向散射强度快速起伏为背景, 重点分析了 UWB SAR 叶簇隐蔽目标差值变化检测的杂波建模方法以及其在目标检测中的应用, 以期通过准确的杂波建模, 提高变化检测的性能。本文的后续结构如下: 第 2 节为杂波分布建模分析, 该部分首先推导了均匀观测场景条件下的差值变化检测杂波分布模型, 而后假设后向散射强度服从伽马分布, 在此基础上进一步推导了与之适应的快起伏场景条件

下的差值变化检测杂波分布模型; 第 3 节为本文所述模型在差值变化检测中的应用, 具体介绍了模型中所需参数的估计方法; 第 4 节为实验验证; 第 5 节为结束语。

2 杂波分布建模分析

2.1 均匀场景杂波建模

记 I_d 、 I_r 为同一均匀后向散射区域不同时刻观测所得原始复数图像, S_d 、 S_r 为相应的强度图像^[13], Z 为差值变化检测测量图像, 则 Z 中任意像素点的灰度值 z 可记为

$$z = s_d - as_r = x^H \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -a \end{bmatrix} x \quad (1)$$

其中, s_d 、 s_r 分别为 S_d 、 S_r 相应点的灰度值; x 为 I_d 、 I_r 中对应点处复数值构成的列矢量 $x = [i_d^* \ i_r^*]^H$, a 为加权因子, 可根据 2 次观测中系统增益变化确定。设观测矢量 x 服从二维零均值复高斯分布^[13], 其协方差矩阵 R 及概率密度函数 $p_x(x)$ 分别表示为

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_d^2 & \rho\sigma_d\sigma_r \\ \rho^*\sigma_d\sigma_r & \sigma_r^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$p_x(x) = \frac{1}{\pi^2 |R|} \exp(-x^H R^{-1} x) \quad (3)$$

其中, ρ 为相关系数, σ_d^2 、 σ_r^2 分别为 2 次观测所得回波功率, 其大小由观测区域的后向散射强度和系统增益决定, 由于均匀场景中后向散射强度处处相同, 因此 σ_d^2 、 σ_r^2 在观测区域为固定常数值。记 $\sigma = \sigma_d$, $r = \sigma_d/\sigma_r$, 则由式(1)~式(3)可得, z 的特征函数可记为

$$g(w) = \frac{-1}{(1-|\rho|^2)ar\sigma^2(w_1 - jw)(w_2 - jw)} \quad (4)$$

其中, w_1 、 w_2 分别为

$$w_1 = \frac{(r-a) + \sqrt{(r-a)^2 + 4ar(1-|\rho|^2)}}{2(1-|\rho|^2)ar\sigma^2} \quad (5)$$

$$w_2 = \frac{(r-a) - \sqrt{(r-a)^2 + 4ar(1-|\rho|^2)}}{2(1-|\rho|^2)ar\sigma^2} \quad (6)$$

对式(4)进行逆傅立叶变化可得:

$$p_z(z) = p_{1z}(z) + p_{2z}(z) \quad (7a)$$

$$p_{1z}(z) = \frac{U(-z)e^{w_1z}}{\sigma^2 \sqrt{(r-a)^2 + 4ar(1-|\rho|^2)}} \quad (7b)$$

$$p_{2z}(z) = \frac{U(z)e^{w_2z}}{\sigma^2 \sqrt{(r-a)^2 + 4ar(1-|\rho|^2)}} \quad (7c)$$

式(7a)、式(7b)、式(7c)所示即为均匀场景条件下差值变化检测的杂波分布模型， $U(-z)$ 为单位阶跃函数。

2.2 快起伏场景杂波建模

与参考文献[14]相同，对于快起伏场景，此处假设 σ^2 服从如下伽马分布：

$$p_{\sigma^2}(\sigma^2) = \frac{1}{\Gamma(v)} \left(\frac{v}{u}\right)^v \sigma^{2(v-1)} \exp\left(-\frac{v}{u}\sigma^2\right) \quad (8)$$

其中， u 为均值 ($u > 0$)， v 为阶数 ($v > 0$)， $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数。则由式(7a)、式(7b)、式(7c)可知：

$$\begin{cases} p_z(z) = p'_{1z}(z) + p'_{2z}(z) \\ p'_{1z}(z) = \int_{-\infty}^0 p_{1z}(z|\sigma^2) p(\sigma^2) d\sigma^2 \\ p'_{2z}(z) = \int_0^{+\infty} p_{2z}(z|\sigma^2) p(\sigma^2) d\sigma^2 \end{cases} \quad (9)$$

由文献[15]可知：

$$\int_0^{\infty} m^{v-L-1} e^{-\frac{s}{m}} dm = 2s^{\frac{v-L}{2}} k_{v-L}(2\sqrt{s}) \quad (10)$$

其中， $k_{v-1}(\cdot)$ 为 $v-1$ 阶第二类修正贝塞尔函数。令 $m = v\sigma^2/u$ ，利用式(7b)、式(8)、式(10)分别对式(9)进行积分化简可得：

$$\begin{cases} p_z(z) = p'_{1z}(z) + p'_{2z}(z) \\ p'_{1z}(z) = \frac{GU(-z)}{\Gamma(v)} \left(\frac{\sqrt{-z}}{2a_1}\right)^{v-1} k_{v-1}\left(\frac{\sqrt{-z}}{a_1}\right) \\ p'_{2z}(z) = \frac{GU(z)}{\Gamma(v)} \left(\frac{\sqrt{z}}{2a_2}\right)^{v-1} k_{v-1}\left(\frac{\sqrt{z}}{a_2}\right) \end{cases} \quad (11)$$

式(11)所示即为后向散射强度快起伏场景条件下，差值变化检测的杂波分布模型，其中：

$$G = \frac{v}{u} \frac{2}{\sqrt{(r-a)^2 + 4ar(1-\rho^2)}} \quad (12)$$

$$a_1 = \sqrt{\frac{(1-\rho^2)aru}{2v\left(r-a + \sqrt{(r-a)^2 + 4ar(1-\rho^2)}\right)}} \quad (13)$$

$$a_2 = \sqrt{\frac{(1-\rho^2)aru}{2v\left(a-r + \sqrt{(r-a)^2 + 4ar(1-\rho^2)}\right)}} \quad (14)$$

3 目标检测应用

3.1 参数估计

显然，实现对式(11)中各项分布参数的估计是将其应用于目标检测的关键。为此，采用矩估计法对分布模型中各项参数的估计方法进行了推导，其具体过程如下。

首先由文献[15]可知：

$$\begin{aligned} & \int_0^{\infty} x^m (x/(2a))^v k_{v-1}(x/a) dx \\ &= \frac{a}{2} (2a)^m \Gamma(0.5m+1) \Gamma(0.5m+v) \end{aligned} \quad (15)$$

利用式(15)对式(11)求积分，并求其一、二、三阶原点矩 m_1 、 m_2 、 m_3 可得如下方程组：

$$\begin{cases} G(k_2 + k_1) = 0.5 \\ v(k_2 - k_1) = m_1 \\ 2v(v+1)(k_2^2 + k_1^2 - k_1k_2) = m_2 \\ 6m_1(v+1)(v+2)(k_2^2 + k_1^2) = m_3 \end{cases} \quad (16)$$

式中 $k_1 = (2a_1)^2 > 0$ ， $k_2 = (2a_2)^2 > 0$ ，对上述方程组进行整理可得如下等式：

$$\begin{cases} \beta_1 v^2 + \beta_2 v + \beta_3 = 0 \\ \beta_1 = 6m_1^3 - 6m_1 m_2 + m_3 \\ \beta_2 = (18m_1^3 - 12m_1 m_2) \\ \beta_3 = 12m_1^3 \end{cases} \quad (17)$$

求解式(17)可得， v 的2个解分别为

$$v = \frac{12m_1^2}{6m_2 - 9m_1^2 - \sqrt{(3m_1^2 - 6m_2)^2 - 12m_1 m_3}} \quad (18)$$

$$v = \frac{12m_1^2}{6m_2 - 9m_1^2 + \sqrt{(3m_1^2 - 6m_2)^2 - 12m_1 m_3}} \quad (19)$$

由式(16)中 m_1 、 m_2 的表达式可得：

$$\frac{m_2}{v(v+1)} - \frac{2m_1^2}{v^2} = 2k_2 k_1 > 0 \quad (20)$$

将式(19)代入式(20)中左边各项可得:

$$\frac{2m_1^2}{v^2(v+1)} \left[\frac{(m_2 - 2m_1^2)}{m_2 - 1.5m_1^2 + \Delta} - 1 \right] < 0 \quad (21)$$

式中, $\Delta = \sqrt{(3m_1^2 - 6m_2)^2 - 12m_1m_3}$ 。由式(20)

与式(21)相互矛盾可知, 式(19)为虚假解, 应舍去。将 v 的真实解式(19)代入方程组(16)可得, 分布参数 v 、 α_1 、 α_2 的计算公式为

$$\begin{cases} v = \frac{6m_1m_2 - 9m_1^3 + m_1\sqrt{(3m_1^2 - 6m_2)^2 - 12m_1m_3}}{6m_1^3 + m_3 - 6m_2m_1} \\ a_1 = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{m_3}{3m_1(v+1)(v+2)} - \frac{m_1^2}{v^2}} - \frac{m_1}{2v} \right)^{1/2} \\ a_2 = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{m_3}{3m_1(v+1)(v+2)} - \frac{m_1^2}{v^2}} + \frac{m_1}{2v} \right)^{1/2} \\ G = \left(\sqrt{\frac{m_3}{3m_1(v+1)(v+2)} - \frac{m_1^2}{v^2}} \right)^{-1} \end{cases} \quad (22)$$

3.2 目标检测

基于上述分析, 本文采用如下方法进行目标变化检测。

1) 图像预处理: 对不同时刻所得观测图像进行图像配准以及相对辐射校正处理, 以使观测区域内的任意一点在变化检测所用参考图像与待检测图像中像素位置与系统增益相同^[16]。

2) 差值变化检测图像构造与杂波分布参数估计: 基于预处理后的图像采用式(1)构造差值变化检测图像。在此基础上, 基于经典滑动检测结构(如图1所示)对差值变化检测图像中每个像素点的邻域杂波分布进行估计, 图1中内窗用于隔离目标对杂波估计的影响, 外窗中的元素用于计算式(22)中杂波参数估计所需各阶样本原点矩。

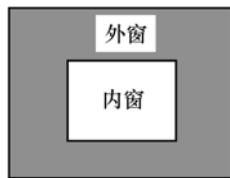


图1 经典滑动检测窗

3) 门限检测: 对差值变化检测图像进行门限检测以确定目标所在区域。检测门限 A_{thr} 的大小可根据杂波分布参数估计结果, 采用式(23)决定。

$$P_f = 1 - P_z(A_{thr}) \quad (23)$$

其中, P_f 为设定的虚警概率, $P_z(\cdot)$ 为后向散射快起伏场景的杂波概率分布函数, 可由式(11)积分得到, 其具体表达式如下:

$$P_z(z) = \begin{cases} \frac{2Ga_1^2}{\Gamma(v)} \left(\frac{\sqrt{z}}{2a_1} \right)^v k_v \left(\frac{\sqrt{z}}{a_1} \right), & z < 0 \\ G \left[a_2^2 - \frac{2a_2^2}{\Gamma(v)} \left(\frac{\sqrt{z}}{2a_2} \right)^v k_v \left(\frac{\sqrt{z}}{a_2} \right) + a_1^2 \right], & z > 0 \end{cases} \quad (24)$$

4 实验验证

为了验证本文杂波建模方法在 UWB SAR 叶簇隐蔽目标差值变化检测中的有效性, 本文基于实测 UWB SAR 图像数据, 采用 2 组实验进行了实验分析。第 1 组实验用于分析本文方法杂波建模的准确性。第 2 组实验用于验证本文所述杂波建模方法对目标检测性能的改善。

4.1 实验 1

图 2(a)和图 2(b)所示为同一树林场景不同时刻观测所得 2 幅 UWB SAR 图像(图像大小 400×300), 图 2(c)所示为相应的差值图像(为了便于观测, 将显示动态范围设置为 $0 \sim 0.3$), 考虑到辐射校正的作用下, σ_d 与 σ_r 之比近似等于 1, 为此, 在差值图像的构造中, 将加权因子相应的设定为 1。在场景中任取一块区域 A(大小为 100×100), 分别采用高斯模型、本文所述的均匀场景杂波模型和本文所述的快起伏场景模型对差值图像进行杂波建模, 所得建模结果如图 3 所示。显然与其他 2 种分布模型相比, 本文所述快起伏场景杂波模型具有更高的建模精度。

4.2 实验 2

为了验证本文所述杂波建模方法对目标检测性能的改善, 分别基于高斯模型、本文所述的均匀场景杂波模型和本文所述的快起伏场景模型进行了差值变化检测实验。图 4 为检测所用图像(图像大小 800×800), 图像 4(b)中白色圆圈内为观测区域内新出现的 25 个军用车辆目标。考虑到车辆目标尺寸的大致大小, 实验过程中将图 1 所示滑动检测结构的内窗尺寸设为 8×8 , 外窗尺寸

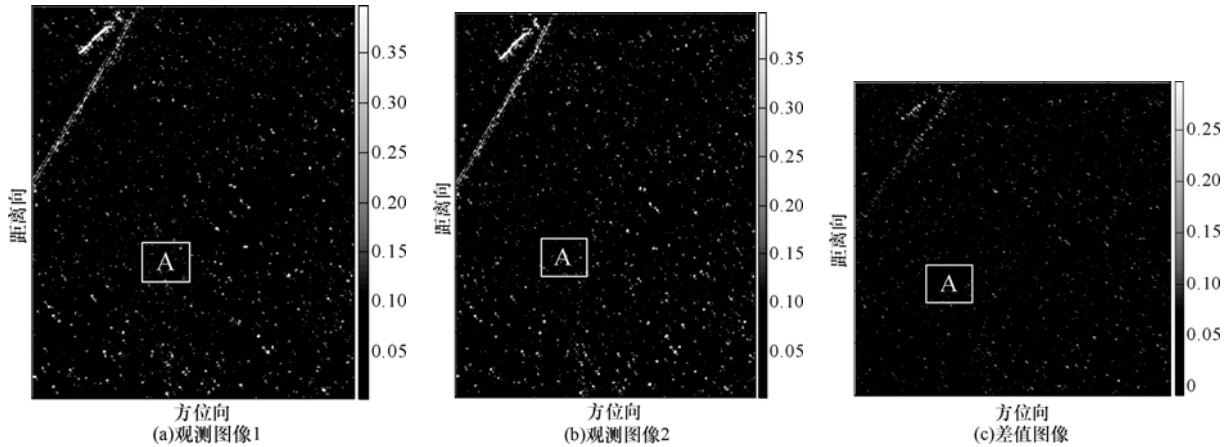


图 2 实验 1 原始图像数据

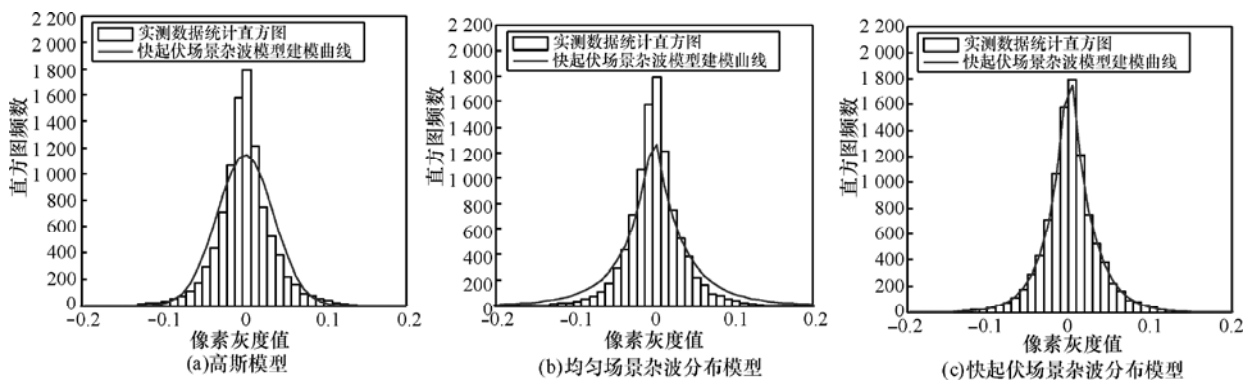


图 3 杂波建模结果

设为 15×15 。图 5 所示为采用各种杂波分布模型所得检测性能曲线。显然与其他 2 种分布模型相比，采用本文所述快起伏场景杂波模型的变化检测性能最优。

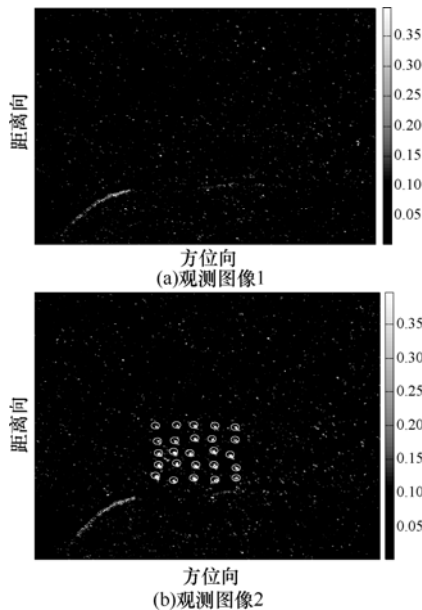


图 4 实验 2 原始图像数据

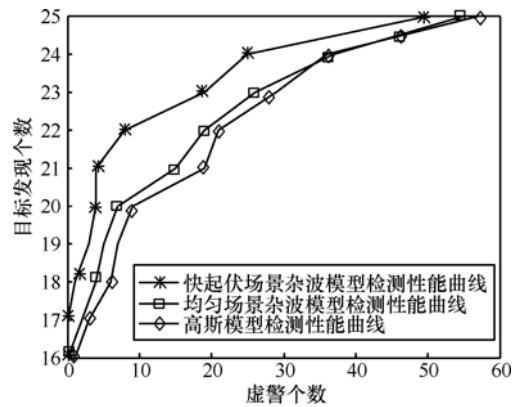


图 5 检测性能曲线

5 结束语

在基于 UWB SAR 图像的叶簇隐蔽目标差值变化检测中，由于 UWB SAR 的叶簇穿透特性，树林区域的后向散射强度呈现快速变化的特点，使得现有的方法难以对差值图像的杂波分布进行准确的建模分析，降低了变化检测性能。为此，本文通过理论分析，将均匀场景条件下的差值变化检测杂波分布模型与伽马随机分布相结合，提出了一种快起

伏场景条件下的差值变化检测杂波分布模型,并将其应用于 UWB SAR 叶簇隐蔽目标差值变化检测,取得了良好的实验效果。

参考文献:

- [1] 梁甸农, 周智敏. 叶簇穿透超宽带成像雷达技术[J]. 国防科技参考, 1999, 20(3):7-10.
LIANG D N, ZHOU Z M. Foliage penetration UWB SAR technique[J]. Reference on National Defense Technology, 1999, 20(3):7-10.
- [2] FLEISCHAMAN J G. Foliage penetration experiment[J]. IEEE Transactions on AES, 1996, 32(1):134-164.
- [3] KAPPOR R, BANERJEE A, TSIHEINRZIS G A, *et al.* UWB radar detection of targets in foliage using alpha-stable clutter model[J]. IEEE Transactions on GRS, 1998, 34(3): 706-715.
- [4] DAVIS M E. Technical challenges in ultra-wideband radar development for target detection and terrain mapping[A]. IEEE Radar Conference 1999[C]. Waltham, 1999. 1-6.
- [5] NOVAK L. Algorithms for SAR change detection, compression and super-resolution[A]. International Radar Conference 2009 [C]. Bordeaux, 2009. 1-10.
- [6] ULANDER M H. Change detection of vehicle-sized targets in forest concealment using VHF- and UHF-band SAR[A]. IEEE Radar Conference 2010 [C]. Washington, 2010. 1054-1059.
- [7] 王广学, 黄晓涛, 周智敏. 基于图像分割的 VHF SAR 叶簇隐蔽目标差值变化检测[J]. 电子学报, 2010, 38(9):1969-1974.
WANG G X, HUANG X T, ZHOU Z M. VHF SAR difference change detection of target in foliage based on image segmentation[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(9):1969-1974.
- [8] 王广学, 黄晓涛, 周智敏. 基于邻域统计分布变化分析的 UWB SAR 隐蔽目标变化检测[J]. 电子信息学报, 2011, 33(1):49-54.
WANG G X, HUANG X T, ZHOU Z M. UWB SAR change detection of target in foliage based on local statistic distribution change analysis[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2011, 33(1): 49-54.
- [9] ULANDER M H. Modeling of change detection in VHF and UHF-band SAR[A]. EUSAR2008[C]. Fridrichshafen, 2008. 127-131.
- [10] LUNDBERG M, ULANDER MH, PIERSON E, *et al.* A challenge problem for detection of targets in foliage[A]. SPIE Conference on Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery[C]. Orlando, 2006. 1-12.
- [11] JAME R, HENDRICKSON R. Efficacy of frequency on detecting targets in foliage using incoherent change detection[A]. SPIE Conference on Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery[C]. Orlando, 1994. 220-229.
- [12] RANNEY I, SOUMEKH I. Signal subspace change detection in averaged multilook SAR imagery[J]. IEEE Transactions on GRS, 2006, 44(1): 201-213.
- [13] LI J S, HOPPEL K W, MANGO SA, *et al.* Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery[J]. IEEE Transactions on GRS, 1994, 32(5): 1017-1027.
- [14] WARD K D. Compound representation of high resolution sea clutter[J]. Electronics Letters, 1981, 17(16):561-563.
- [15] REDDING N J. Estimation the Parameters of the K Distribution in the Intensity Domain[R]. DSTO Electronics and Surveillance Laboratory, South Australia, 1999. 14-15.
- [16] 黄勇. SAR 图像变化检测及相关技术研究[D].成都: 电子科技大学, 2007. 5-6.
HUANG Y. Related Research on SAR Image Change Detection[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2007. 5-6.

作者简介:



王广学 (1981-), 男, 江苏南通人, 国防科学技术大学博士生, 主要研究方向为 SAR 图像处理、SAR 目标检测等。

黄晓涛 (1972-), 男, 湖北武汉人, 国防科学技术大学教授、博士生导师, 主要研究方向为 SAR 信号处理、阵列信号处理等。

周智敏 (1957-), 男, 河北易县人, 国防科学技术大学教授、博士生导师, 主要研究方向为 SAR 系统设计、高速实时信号处理等。