

高分辨率 SAR 图像散射中心特征提取

娄 军* 金 添 宋 千 周智敏
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘 要: 合成孔径雷达(SAR)目标检测和识别是 SAR 实用化的瓶颈技术之一, 提取有效的目标特征是 SAR 目标检测与识别的关键环节。高分辨率 SAR 图像中, 目标属性散射中心特征反映了目标散射中心的位置、类型等信息, 精确获取目标散射中心属性特征能够提高对目标的检测识别性能。针对 SAR 目标属性散射中心特征的提取, 该文提出了一种基于改进的空间-波数分布(ISWD)的特征提取方法, 该方法首先利用 ISWD 估计散射中心关于频率与方位角的函数, 然后利用该函数来获得目标属性散射中心模型参数。最后利用仿真实验验证了方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 散射中心; 特征提取; 空间-波数分布

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)07-1661-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00960

Feature Extraction of Scattering Centers in High-resolution SAR Image

Lou Jun Jin Tian Song Qian Zhou Zhi-min

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

Abstract: Synthetic Aperture Radar (SAR) targets detection and identification technology is one of the choke points for SAR practical application. Extraction of effective feature is the key of SAR targets detection and identification. The information of SAR target scattering center position and type is reflected by target attribute scattering center feature, so accurately extraction target attribute scattering center feature can improve the performance of SAR target detection and identification. A feature extraction method of SAR target attribute scattering centers based on the Improved Space-Wavenumber Distribution (ISWD) is proposed in this paper. The function of scattering center respected to frequency and aspect is computed using the ISWD, then the target attribute scattering centers model parameters are estimated via this function. The results of the computer simulation experiment show the validity of the method.

Key words: SAR; Scattering centers; Feature extraction; Space-Wavenumber Distribution (SWD)

1 引言

合成孔径雷达(SAR)特别是高分辨SAR已成为一种不可或缺的军事侦察和民用遥感信息获取手段, 高分辨SAR图像数据获取能力日益提高。然而, 与此不相宜的是高分辨SAR图像解译技术的发展相对滞后, 已成为制约高分辨SAR应用的瓶颈, 亟待突破。SAR目标自动识别(SAR ATR)技术是SAR图像解译的重要方面, SAR ATR的一般流程为: 首先从观测到的SAR图像中找到可能包含目标的感兴趣区域(ROI), 然后从ROI中提取目标特征, 最终通过对特征的比较达到识别目标的目的^[1,2]。该流程表明, 选择有效的目标特征, 并能对其快速提取, 是目标

识别的关键。复杂目标的雷达后向散射可以近似为多个散射中心响应的叠加, 因此利用散射中心信息作为特征是SAR目标识别的有效途径^[3,4]。目前, 研究人员利用目标散射中心的幅度和位置信息, 即对应于SAR图像中的峰值特征或间隙度特征, 进行目标识别^[5,6], 该方法并没有完全利用散射中心信息。属性散射中心理论^[7]认为, 目标散射中心的信息除幅度位置外还包括散射类型、散射特性等更丰富的可用于目标分类识别的有效信息, 因此, 从SAR图像中提取目标属性散射中心特征将进一步提高SAR目标的检测与识别的性能。

文献[8,9]提出了基于空间-波数分布(SWD)的目标距离-方位-频率-方位角 4 维散射函数估计方法, 并应用于超宽带 SAR 地雷与未爆物的检测。直接利用 4 维散射函数作为检测和识别的特征向量显然维数太高, 因此我们通过特征选择选取的是若干个方位角和频率下对应的 1 维距离切片, 将其首尾

2010-09-03 收到, 2010-12-09 改回

国家自然科学基金(60972121)和全国优秀博士学位论文作者专项基金(201046)资助课题

*通信作者: 娄军 loujun@nudt.edu.cn

相连作为特征向量。当利用该方法进行车辆等其它目标的检测和识别时,则需要重新进行特征选择操作,获得相应的稳健特征。而且当目标不是地雷这类轴对称目标时,需要考虑目标姿态角对特征提取的影响。为了获得不同姿态角下目标的特征,不仅需要各种姿态下的训练样本,而且最后的特征向量维数也相当高。因此通过4维散射函数获取散射中心的属性特征一方面能够获得与目标姿态无关的特征,另一方面可以获得维数较低的特征向量。

SWD计算中窗函数的选取会影响4维散射函数幅度的估计。如果采用1维距离像作为特征,然后利用基于监督的分类器进行检测和识别时,由于窗函数对学习样本和检测样本的影响是一样的,因此可以忽略窗函数的影响^[8]。然而,如果需要估计属性散射中心的参数时,窗函数的影响就不能忽略了。因此本文对SWD中的窗函数进行了改进,采用自适应窗函数降低散射中心之间的干扰,有利于提高目标属性散射中心参数的估计精度。基于改进的SWD,本文提出了一种高分辨率SAR散射中心特征提取方法。首先利用改进的空间波数分布方法快速准确获得目标散射中心位置上关于频率与方位角的散射函数,然后利用最小二乘方法进一步估计目标属性散射中心参数,最终获得目标属性散射中心特征。

2 目标属性散射中心理论及其SAR成像模型

2.1 目标属性散射中心理论

文献[7]基于几何绕射理论(GTD),给出了目标属性散射中心模型,该模型体现了散射中心的回波与频率和方位角之间的关系,设 $E_i(f, \theta)$ 为第 i 个散射中心回波,则

$$E_i(f, \theta) = G_i(f, \theta) \cdot \exp\left(\frac{-j4\pi f r_i}{c}\right) \quad (1)$$

式中 f 为雷达回波的采样频率, θ 为方位角; r_i 为散射中心与雷达天线之间的距离; c 为电磁波传播速度; $G_i(f, \theta)$ 为第 i 个散射中心的散射函数,它反映了由散射中心几何结构所决定的散射中心散射特性:

$$G_i(f, \theta) = A_i (jf/f_c)^{\alpha_i} e^{\beta_i \theta} \quad (2)$$

式中 f_c 为雷达中心频率;参数集 $\{A_i, \alpha_i, \beta_i\}$ 体现了第 i 个散射中心的电磁散射特征,其中 A_i 为幅度; β_i 为散射中心的方位角依赖因子; $\alpha_i \in [-1, -0.5, 0, 0.5, 1]$ 为频率依赖。 α_i 的不同取值可以区分散射体的几何形状: $\alpha_i = 1$ 表示平板反射,二面角反射; $\alpha_i = 0.5$ 表示单曲面反射; $\alpha_i = 0$ 表示点散射、双

曲面反射、直边镜面反射; $\alpha_i = -0.5$ 表示边缘绕射; $\alpha_i = -1$ 表示角绕射。

在高频区,目标的散射回波可以归结为有限个独立散射中心回波的叠加,如果某物体包含 I 个散射中心,则其总的回波为这 I 个散射中心之和。

2.2 散射中心SAR成像模型

本文以正侧视条带SAR为例,来探讨散射中心SAR回波与成像模型,条带SAR斜距平面上几何关系如图1所示,天线沿方位向运动,设第 i 个散射中心的坐标为 (x_i, y_i) ,由属性散射中心理论可知,每个孔径位置 $(0, u)$ 处雷达接收到的目标散射回波如式(3)所示:

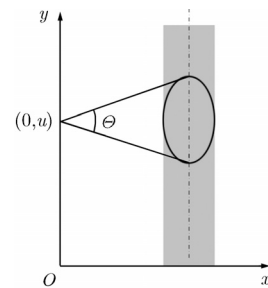


图1 条带SAR斜距平面上几何关系

$$s(f, u) = \sum_{i=1}^I \frac{1}{(u - y_i)^2 + x_i^2} g_A(f, \theta) G_i(f, \theta) \cdot \exp\left\{\frac{-j4\pi f}{c} \sqrt{(u - y_i)^2 + x_i^2}\right\} \quad (3)$$

式中 $g_A(f, \theta)$ 为天线方向图,它也是和频率与方位角有关的函数; $f_{\min} < f < f_{\max}$, $[f_{\min}, f_{\max}]$ 为雷达有效频带,方位角 θ 由散射中心与天线相对几何位置决定,且 θ 的绝对值小于等于成像积累角 Θ 一半。

SAR成像过程中,存在如下变换^[8]:

$$\left. \begin{aligned} f &= \frac{c\sqrt{k_x^2 + k_y^2}}{4\pi} \\ \tan \theta &= -k_y/k_x \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 k_x 表示距离波数, k_y 表示方位波数。从式(4)中可以看出, $f - \tan \theta$ 与 $k_x - k_y$ 具有一一对应的关系,因此目标散射函数 $G_i(f, \theta)$ 又可以记为 $G_i(k_x, k_y)$,同理,天线方向图也可记为 $g_A(k_x, k_y)$ 。

3 SAR图像中目标属性散射中心估计

由前面介绍可知,在SAR回波中,包含了目标丰富的频率与方位角信息,然而,这些信息并没有显性体现在SAR图像中,研究如何从图像中将这些信息还原,并进一步估计目标属性散射中心参数,得到目标属性散射中心参数,对于SAR目标识别具有重要的意义。本文提出一种基于改进空间-波数分

布的目标属性散射中心特征提取方法, 该方法首先通过图像预处理估计散射中心位置, 然后利用改进的空间-波数分布得到散射中心的散射函数, 最后通过最小二乘估计散射中心参数。

3.1 图像预处理

输入数据实际上是一幅包含目标与噪声 SAR 复图像, 图像中的目标区域主要由若干散射中心构成, 采用较为成熟的恒虚警(CFAR)检测方法, 从输入的原 SAR 图像中提取目标区域切片(ROI), 该切片所代表的实际范围应稍大于感兴趣目标的尺寸。

然后利用文献[4]中的图像分割算法, 将 ROI 内第 i 个散射中心完整地划分到一个单独的小区域 $D_i(m, n)$ 中, 然后计算在距离向和方位向的质量中心:

$$m_i = \left[\frac{\sum_m \sum_n m \cdot D_i(m, n)}{\sum_m \sum_n D_i(m, n)} \right], n_i = \left[\frac{\sum_m \sum_n n \cdot D_i(m, n)}{\sum_m \sum_n D_i(m, n)} \right] \quad (5)$$

式中 $[\alpha]$ 代表取小于或等于 α 的整数, 则 (m_i, n_i) 为目标第 i 个散射中心所处的像素点。

3.2 改进的空间-波数分布方法

得到某个散射中心所处的位置后, 下一步需要估计该散射中心的散射特性。子带-子孔径(subband-subaperture)处理方法可以获取超宽带 SAR 目标在某个频段和方位角范围内的散射特性^[10], 但是这种方法将会导致距离和方位分辨率的大幅降低。在文献[8]中借鉴时频分析中 Wigner-Ville 分布(WVD)的思想, 提出了利用空间-波数分布(SWD)方法, 该方法能够在不改变空间分辨率下获取目标对应于不同频率和方位角时的目标 1 维距离像。文中我们定义了基于 WVD 的距离-方位-距离波数-方位波数 4 维的空间-波数变换(WVD-SWD), 给出了该变换在图像域连续形式表达式:

$$F_{\text{WVD}}(x, y, k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s\left(x + \frac{x'}{2}, y + \frac{y'}{2}\right) s^*\left(x - \frac{x'}{2}, y - \frac{y'}{2}\right) \cdot \exp(-jx'k_x - jy'y_k) dx' dy' \quad (6)$$

其中 $s(x, y)$ 为 SAR 图像中待鉴别目标的图像。WVD-SWD 为双线性变换, 可以通过其得到对应于任意位置 (x, y) 处的波数域 k_x - k_y 功率分布。

下面对空间-波数分布进一步分析, 注意到式(6)为积分限从负无穷到正无穷的连续积分, 而需要处理的 SAR 图像实际上是由离散像素点组成的有限长 2 维数组, 因此需要将式(6)重写为离散的形式, 并且对距离滞后变量 x' 和方位滞后变量 y' 进行加窗

处理, 使得积分限有界。本文重新定义基于 WVD 分布的离散空间-波数分布表达式为

$$F_{\text{WVD}}(m, n, p, q) = \sum_{k=-N_2+1}^{N_2-1} \sum_{l=-N_1+1}^{N_1-1} h(k, l) \cdot s(m+k, n+l) \cdot s^*(m-k, n-l) \cdot e^{-2\pi j(kp/P+lq/Q)} \quad (7)$$

式中 $s(m, n)$ 为 2 维图像数组, m 与 n 分别为距离 x 与方位 y 的均匀离散采样序列, 采样间隔为 Δx 与 Δy ; $h(k, l)$ 为 2 维平滑窗, 其距离向上的长度为 $P = 2N_2 - 1$, 方位向上的长度为 $Q = 2N_1 - 1$; $p = 0, \pm 1, \dots, \pm(N_2 - 1)$ 与 $q = 0, \pm 1, \dots, \pm(N_1 - 1)$ 分别为距离波数 k_x 与方位波数 k_y 的均匀离散采样序列, 其采样间隔分别为 $4\pi/P\Delta x$ 与 $4\pi/Q\Delta y$ 。

在文献[8]中, 将目标对应于不同频率和方位角下的 1 维距离切片, 首尾相连作为用于地雷目标识别的特征矢量, 为了获得目标对应于不同频率和方位角下距离像的高分辨率, 我们将窗的大小取为整个目标 ROI 切片的大小, 然后采用基于监督的分类器进行检测与识别, 并不需要考虑 SWD 中窗函数对散射特性幅度的影响。而在散射中心属性特征提取问题中, 需要通过散射中心散射特性幅度精确估计散射中心模型参数, 此时目标被分解为若干个属性散射中心的组合, 如果仍然将窗的大小取为整个 ROI 切片大小, 将会引起目标散射中心之间的互相干扰。因此, 必须重新考虑平滑窗的选择, 若窗取的太大, 会引入其他散射中心能量的影响, 若取的太小, 会导致分辨率的下降。

在估计散射中心位置时, 利用图像分割方法将 ROI 中的每个散射中心都完整地划分到一个单独的小区域中, 使得不同的散射中心被分离开来, 该区域能够在排除其他散射中心能量影响的同时最大限度地包含了该散射中心自身的能量。因此, 可以将窗的选择与散射中心分割的结果联系起来, 设 D_i 为第 i 个散射中心分割后所得到的分割区域, 则平滑窗为

$$h(k, l) = \begin{cases} 1, & s(m \pm k, n \pm l) \in D_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

这样, 平滑窗的大小自适应为散射中心的分割区域, 在空间-波数变换时能够有效避免其他散射中心能量的干扰。

WVD 存在严重的交叉项干扰, 采用加窗处理后的 WVD 分布具有一定的交叉项抑制能力, 但对于参数精确估计问题, 还需要进一步抑制交叉项的影响。Choi-Williams 分布(CWD)具有好的交叉项抑制能力, 我们在文献[9]中还定义了基于 CWD 的

空间波数变换(CWD-SWD), CWD-SWD 可以通过 WVD-SWD 与一个确定的函数卷积得到, 应用中同样需要加窗处理使得积分有界并离散化适应实际计算需要。其分析方法与 WVD-SWD 类似, 这里不再赘述。

利用改进的空间波数分布方法计算 (m_i, n_i) 处的波数域功率分布 $F(m_i, n_i, p, q)$, 该分布即为 (m_i, n_i) 处散射中心的散射函数与天线方向图乘积模的平方,

$$F(m_i, n_i, p, q) = |g_A(p, q)G_i(p, q)|^2 \quad (9)$$

式中 $g_A(p, q)$ 与 $G_i(p, q)$ 分别为 $g_A(k_x, k_y)$ 与 $G_i(k_x, k_y)$ 的离散采样, 通过该式可以求得 $|G_i(p, q)|$ 。

3.3 参数估计

得到散射中心的散射函数后, 可以通过其来估计散射中心的参数。由于距离波数 k_x 与方位波数 k_y 的均匀离散采样, 其对应的频率 f 与方位角 θ 也为离散的值, 由式(7), 有

$$\left. \begin{aligned} f(p, q) &= c \sqrt{\left(\frac{p}{P\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{q}{Q\Delta y}\right)^2} \\ \theta(p, q) &= \text{atan} \left[-\frac{q/(Q\Delta y)}{p/(P\Delta x)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

设同时满足 $f_{\min} < f(p, q) < f_{\max}$ 且 $-\Theta/2 < \theta(p, q) < \Theta/2$ 的所有 (p, q) 组合有 M 个, 由式(2), 这 M 个 (p, q) 组合均有

$$|G_i(p, q)| = A_i \left(\frac{f(p, q)}{f_c} \right)^{\alpha_i} e^{\beta_i \theta(p, q)} \quad (11)$$

从该式中求解参数 A_i, α_i, β_i , 该问题为一个非线性最小二乘估计问题, 直接求解较为复杂, 我们可将其化为线性最小二乘估计问题, 对式(11)等号两边同时取对数可得

$$\ln |G_i(p, q)| = \ln A_i + \alpha_i \ln \left(\frac{f(p, q)}{f_c} \right) + \beta_i \theta(p, q) \quad (12)$$

将这 M 个频率 $f(p, q)$ 排列为 f_1, f_2, \dots, f_M , M 个方位角 $\theta(p, q)$ 排列为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M$, M 个 $|G_i(p, q)|$ 排列为 $|G_{i1}|, |G_{i2}|, \dots, |G_{iM}|$, 将式(12)写为向量形式, 有

$$\mathbf{G}_i = [\mathbf{1} \ \mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2][\ln A_i \ \alpha_i \ \beta_i]^T \quad (13)$$

其中 $\mathbf{1}$ 为 $M \times 1$ 维全 1 向量, $\mathbf{x}_1 = [\ln(f_1/f_c), \ln(f_2/f_c), \dots, \ln(f_M/f_c)]^T$, $\mathbf{x}_2 = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M]^T$, $\mathbf{G}_i = [\ln |G_{i1}|, \ln |G_{i2}|, \dots, \ln |G_{iM}|]^T$ 。

求解该线性最小二乘问题, 设 $\mathbf{x} = [\mathbf{1} \ \mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2]$, 最终参数估计结果为

$$[\ln A_i \ \alpha_i \ \beta_i]^T = (\mathbf{x}^T \mathbf{x})^{-1} \mathbf{x}^T \mathbf{G}_i \quad (14)$$

4 仿真实验与分析

计算机仿真实验中, 假设某目标体包含 4 个散

射中心, 每个散射中心的参数如表 1 所示。设雷达系统采用频率步进体制, 系统带宽 2 GHz, 天线波数角宽度约 45° , 采用 BP 算法进行成像。

表 1 模拟的散射中心参数取值

参数	A	α	β	散射类型
散射中心 1	1	0	0	球
散射中心 2	1	0.5	0	帽顶
散射中心 3	1	1	1	三面角
散射中心 4	1	1	-1	三面角

利用本文提出的目标散射中心特征提取方法进行处理, CFAR 处理提取得到目标 ROI 切片如图 2 所示, 该切片像素大小为 112×110 。分割后每个散射中心所属区域如图 3 所示, 计算该区域质量中心即为散射中心的位置, 在该位置处进行空间-波数变换得到散射中心的散射函数, 变换时窗函数大小分别取为 100×100 , 50×50 , 10×10 以及本文提出的基于散射中心分割结果的自适应窗, 然后利用最小二乘估计得到每个散射中心的参数。图 4 给出了雷达回波信噪比一定时, 平滑窗取为不同大小时的参数估计结果, 可以看出, 平滑窗长度为 100×100 与 50×50 时, 散射中心之间都会产生干扰, 从而导致了属性散射中心参数估计精度较差; 而平滑窗长度只有 10×10 时, 空间波数分布变换后得到的散射中心位置处的波数域功率分布分辨率不够, 得到的参数估计精度同样也不理想。而本文提出的自适应窗空间-波数变换, 可以根据每个散射中心自适应调整窗函数的大小, 能够保证分辨率的同时有效避免散射中心之间的干扰, 得到的参数估计结果误差最小。

图 5 给出了不同雷达回波信噪比下, 本文提出的属性散射中心参数估计方法对参数 α 的估计性能。参数 α 可以区分散射体类型, 其真实值一般为 0.5 的整数倍, 因此当 α 估计值与真实值误差小于 0.25 时, 对应于图中信噪比大于 -15 dB 时, 可以对散射中心类型进行分类。

5 结论

本文提出了一种基于改进空间-波数分布的高分辨率 SAR 目标属性散射中心特征提取方法。针对空间-波数分布变换时平滑窗的选择问题, 提出了基于散射中心分割结果的自适应窗的空间-波数分布变换, 避免了平滑窗太大带来的其他散射中心能量

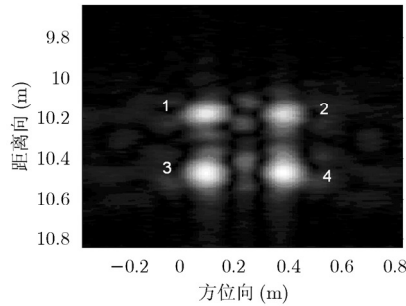


图2 目标 ROI 切片

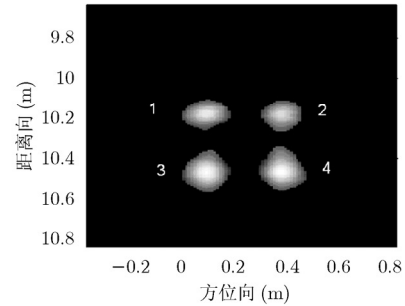
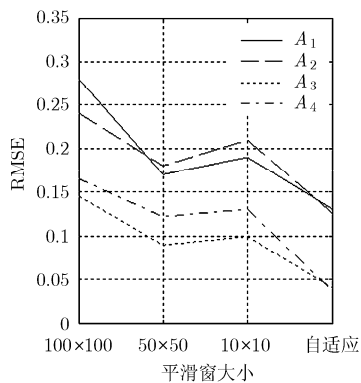
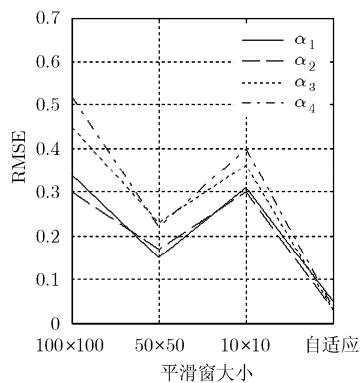


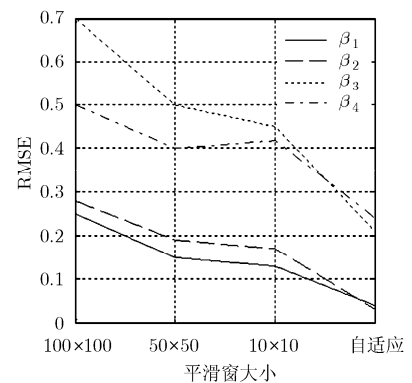
图3 散射中心分割结果



(a) 参数 A_i 估计误差



(b) 参数 α_i 估计误差



(c) 参数 β_i 估计误差

图4 SNR = 0 dB 时, 平滑窗不同大小时的参数估计结果

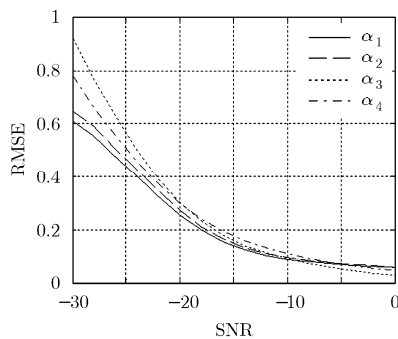


图5 基于改进 SWD 的参数 α_i 估计误差与信噪比关系

的影响与平滑窗太小导致的分辨率下降。利用该变换计算每个散射中心位置处的波数域功率分布, 通过该分布进一步计算目标关于频率与方位角的散射函数, 最后通过最小二乘方法估计得到目标散射中心的参数。仿真实验验证了方法的有效性。

参考文献

[1] Novak L M, Owirka G J, and Warver A L. Automatic target recognition using enhanced resolution SAR data [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 1999, 35(1): 157-175.

[2] Yu Hong-bo, Lei Li-ping, Xie Zhi-ping, and Chen Huai-xin.

Application of assistant knowledge to detect and recognize target in SAR imagery synthetic aperture radar [C]. 2009 APSAR, Xi'an, China, Oct 26-30, 2009: 860-863.

[3] Lin Yue-song, Xue An-ke, Peng Dong-liang, and Jin Zhao-yang. SAR imagery scattering center extraction and target recognition based on scattering center model [C]. Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China, 2006: 9631-9636.

[4] 计科峰. SAR图像目标特征提取与分类方法研究[D]. [博士学位论文], 国防科技大学, 2003.

Ji Ke-feng. Feature extraction and classification of SAR image target [D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defence Technology, 2003.

[5] Wang Zheng-ming and Wang Wei-wei. Fast and adaptive method for SAR superresolution imaging based on point scattering model and optimal basis selection [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(7): 1477-1486.

[6] 王世晞, 李禹, 刘军, 计科峰, 粟毅. 一种基于间隙度特征的 SAR 图像车辆目标鉴别算法[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(8): 1944-1948.

Wang Shi-xi, Li Yu, Liu Jun, Ji Ke-feng, and Su Yi. An algorithm of vehicle target discrimination in SAR imagery with lacunarity feature [J]. *Journal of Electronics &*

- Information Technology*, 2008, 30(8): 1944-1948.
- [7] Potter L C and Moses R L. Attributed scattering centers for SAR ATR [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(1): 79-91.
- [8] Jin Tian and Zhou Zhimin. Ultrawideband synthetic aperture radar landmine detection [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3561-3573.
- [9] Jin Tian and Zhou Zhi-min. Ultrawideband synthetic aperture radar unexploded ordnance detection [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(3): 1201-1213.
- [10] Kappor R, Lawrance Carin, and Baum C E. Polarimetric SAR imaging of buried landmines [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(6): 1985-1998.
- 娄 军: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像、目标检测与识别.
- 金 添: 男, 1980年生, 博士, 副教授, 研究方向为 SAR 成像算法、目标检测技术、目标电磁建模、机器学习等.
- 周智敏: 男, 1957年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代雷达系统设计、实时信号处理等.