

基于 RCS 曲线的 SAR 图像点目标变化检测

黄世奇, 刘代志, 蔡欣华, 王仕成

(第二炮兵工程学院, 西安 710025)

摘 要: 地物目标的物理结构、表面粗糙度或地物目标类型发生了变化, 则其后向散射能量一般会发生相应的变化, 对应的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)也会发生变化, 这将导致合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)图像的亮度和色泽发生变化。提出了一种新的基于 RCS 曲线特性的 SAR 图像目标变化检测算法。该算法不同于以往的基于图像域的变化检测算法, 从目标的散射特性提取目标的变化信息, 避免了不同时相的 SAR 图像对误配准所带来的错误。并进行了仿真实验, 实验结果表明可行。

关键词: RCS 曲线; SAR 图像; 目标变化检测; 散射特性

中图分类号: TN75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2010)01-0222-06

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2010.01.036

0 引言

SAR 是一种主动地微波遥感成像雷达, 它具有全天候、全天时获取遥感数据的能力, 这弥补了光学和红外遥感的不足, 尤其在环境和气候条件恶劣的条件下, 对目标的检测和识别发挥了无可替代的作用^[1-4]。如何有效、快速、准确地提取遥感观测提供的海量数据中的变化信息, 并用于环境、农业、海洋、生态系统以及人类面临的各种自然或人为灾害的预防、军事情报侦测、战场动态监视等, 已经成为遥感应用研究中的焦点问题。SAR 图像变化检测技术是指利用同一区域的不同时期的 SAR 图像来获取地物目标的变化信息, 并进一步实现对目标定性或定量的分析。目前, SAR 图像变化检测技术已逐渐成为遥感研究中的热点, 具有广泛的应用潜力, 尤其在突发的自然或人为灾难方面能及时定位并提供可靠信息。

SAR 是相干成像, 这不可避免地产生了斑点噪声, 这给 SAR 图像变化检测及应用带来了许多困难。另外, SAR 成像不仅受雷达系统参数的影响, 如波长、极化方式等, 而且还受地表参数的影响, 如地表粗糙度、复介电常数等。尤其是雷达入射角和方位角, SAR 目标成像对这两个参数非常敏感, 这给多时相的 SAR 图像配准带来了极大的挑战和难度。这两个因素严重妨碍了 SAR 图像变化检测技术的

发展和应用, 并且 SAR 成像机理不同于光学和红外遥感成像, 通常的变化检测方法直接应用于 SAR 图像, 很难取得理想的效果。虽然许多学者从不同角度提出了不同的变化检测算法^[5-15], 但是这些算法均是针对一定的目的和用途提出来的, 都有其优势和局限性, 到目前为止, 还没有一个统一的标准, 也没有一种最优的算法, 而且多时相 SAR 图像变化检测技术很不完善, 尤其在实际应用中更是如此。这些研究都是从图像的角度进行的, 无法避开斑点噪声和误配准带来的影响。SAR 图像是地物目标散射特性的反映, SAR 成像实质是地物目标散射特性空间到目标影像空间的映射。所以本文从地物目标散射特性的角度研究 SAR 图像目标的变化检测。在目标散射特性测量中, 对于点目标是通过测量其雷达散射截面来实现的, 对于分布目标是通过测量其后向散射系数来完成的。同时, 同一地物目标在不同分辨率的 SAR 图像中表现不一样, 例如坦克在高分辨率 SAR 图像中体现为多散射中心, 而在低分辨率 SAR 图像中呈现为点目标, 这里只研究低分辨率的 SAR 图像点目标的变化检测问题。

1 SAR 图像与后向散射系数的对应模型

雷达波束是以雷达天线为中心的球面波, 假设雷达发射机发射的功率为 P_t , 天线增益为 G_t , 地物

目标在距离天线 R 处接收到雷达波,则在地物目标处单位面积上所接收的功率密度为

$$s_i = P_i G_i / (4 \pi R^2) \quad (1)$$

地物目标在获得微波辐射能量后向雷达天线方向再反射回去,如果其有效的散射面积为 σ ,那么它向雷达天线反射的总的回波功率为

$$P_T = s_i \sigma = P_i G_i \sigma / (4 \pi R^2) \quad (2)$$

回波同样是球面波,只不过是地物目标为中心。这样雷达天线处单位面积接收到地物目标散射回波功率密度为

$$s_r = \frac{P_T}{4 \pi R^2} = \frac{P_i G_i}{4 \pi R^2} \sigma \frac{1}{4 \pi R^2} \quad (3)$$

如果雷达天线的接收有效面积为 A_r ,那么雷达接收到的散射回波总功率为

$$P_r = s_r A_r = \frac{P_i G_i}{4 \pi R^2} \sigma \frac{1}{4 \pi R^2} A_r \quad (4)$$

对于单站雷达来说,雷达发射和接收天线是一根天线,故接收与发射天线的增益是一样的,即 $G_r = G_i$ 。天线增益与天线接收有效面积及波长 λ 之间存在这样的关系

$$G = G_r = G_i = 4 \pi A_r / \lambda^2 \quad (5)$$

把式(5)代入式(4),可得^[15]

$$P_r = P_i A_r^2 \sigma / (4 \pi \lambda^2 R^4) \quad (6)$$

式(6)称为雷达方程,它描述了雷达发射机发射雷达波束后由地物目标后向散射与雷达天线所接收到的回波功率。这个方程主要用来描述点目标的后向散射,对于面目标通常采用地物单位面积的平均散射系数 σ^0 来表达地物的散射特性,假设雷达波束照射到地物的面积为 A ,则地物目标总的有效散射截面为 $\sigma = \sigma^0 A$ 。因此,对于分布目标的雷达方程为

$$P_r = \frac{P_i G^2 \lambda^2}{(4 \pi)^3 R^4} \sigma^0 A \quad (7)$$

雷达照射面积 A 为雷达波束方位向分辨率与距离向分辨率的乘积,即雷达图像的分辨单元, $A = \rho_a \rho_r$, ρ_a 与 ρ_r 分别为方位向和距离向的分辨率。雷达接收到地物目标的后向散射功率后,经过复杂的成像处理,就可获得多种雷达图像,如雷达幅度图像、雷达功率图像(后向散射强度图像)、相位图像、对数图像等。一般的 SAR 图像是二维分布的 DN 值,范围 0 至 255,很直观地反映了地物目标后向散射的强弱。所以,严格地说,雷达功率图像与地物目

标的后向散射系数 σ 之间存在着对应关系。

SAR 图像的二维像元矩阵与地表后向散射系数的对应关系如图 1 所示^[2]。像元 $I(i, j)$ 的强度或数字值与相应地面单元后向散射的能量 P_r 有关,其关系为

$$I(i, j) = DN(i, j) = a \sqrt{P_r(i, j)} + b \quad (8)$$

式(8)中 a 和 b 为比例常数,上述关系假设接收机采用线性检测。像 Seasat, SIR-A/B/C 均采用这种方法,所接收到的能量 $P_r(i, j)$ 与地面单元雷达后向散射系数 $\sigma^0(i, j)$ 成直接的比例关系^[2],即

$$P_r(i, j) = k(i, j) \sigma^0(i, j) \quad (9)$$

结合式(7),可得到式(10),即

$$k(i, j) = \frac{P_i G^2 \lambda^2}{(4 \pi)^3 R^4} A \quad (10)$$

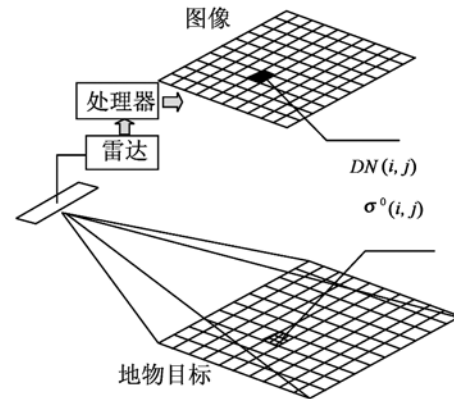


图 1 雷达后向散射系数与数字数值之间的关系
Fig. 1 Relation between radar backscattering coefficient and digital numerical value

从式(10)可以看出, $k(i, j)$ 是一个与距离有关的因子,它与发射功率、到目标的距离、地面单元的大小、发射电磁波的波长及天线的增益函数有关。如果在绝对尺度上已知 $k(i, j)$,就可以把 $DN(i, j)$ 直接地与 $\sigma^0(i, j)$ 联系起来,生产一幅在绝对尺度上强度和后向散射系数有直接联系的图像。如果只知道 $k(i, j)$ 的相对变化,就可以生成一幅相对的雷达回波图像。

2 RCS 曲线的获取与变化检测

雷达散射截面是度量雷达目标对照射电磁波散射能力的一个物理量,是地物目标散射的主要特征信号,直接反映了目标对电磁波散射的强弱,是雷达探测目标、研究隐身技术和伪装的重要参数。人造

目标均是高频区域的复杂目标,具有非常复杂的散射机理,通过研究和分析这些目标的 RCS,对制定相应的伪装、反侦察和防空措施,保障此类目标的安全,具有重要意义。尤其在目标毁伤变化检测中,可通过 RCS 的变化,可以推出目标散射机理的变化,继而推断目标的物理功能的毁伤程度。

RCS 的定义为单位立体角内目标朝接收方向散射的功率与从给定方向入射于该目标的平面波功率密度之比的 4π 倍^[15]。

$$\sigma = 4\pi R^2 \left[\frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \right] \quad (11)$$

当距离 R 足够远时,照射目标的人射波近似为平面波,这时 σ 与 R 无关。因此定义远场 RCS 时, R 应趋向无限大,即要满足远场条件,同时根据电场与磁场的储能可互相转换的原理,所以远场 RCS 的表达式应为

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|H_s|^2}{|H_i|^2} \quad (12)$$

从第 1 部分的分析可知, SAR 图像的数字数值与地物目标后向散射系数之间存在某种对应关系。如果地物目标的散射特性发生了变化,那么对应的 SAR 图像也会发生变化;如果 SAR 图像发生了变化,那么可以推演出地物目标的散射特性发生了变化。所以,可以通过测量目标后向散射能量来检测目标的变化。对于一个确定 SAR 来说,其接收到目标后向散射能量主要由目标表面物理结构(表面粗糙度)和目标介质材料(介电常数)决定,如果目标的介质材料不一样,目标的 RCS 也会发生很大的变化,因此还可以通过目标的 RCS 变化对目标的伪装进行检测和识别。为了方便研究,减少计算量,在研究中用功率图像的灰度值代替地物目标后向散射能量,即目标的 RCS。

利用目标 RCS 进行变化检测流程如图 2 所示。从图 2 中可知,基于 RCS 的 SAR 图像目标的变化检测主要包括以下 3 部分:

(1) 建立目标的 RCS 曲线库。由 SAR 的应用可知,在和平时期可以针对某些感兴趣的目标的 RCS 进行测量,或者通过研究那些感兴趣的目标的散射机理,并建立散射模型,然后计算目标的 RCS。把这些数据存起来,作为相应的 RCS 曲线数据库。

(2) 获得目标变化前的 RCS 曲线。在目标变化前通过获取目标的 SAR 图像,经过系列的预处理,然后计

算目标区域图像的灰度值和目标方位角。根据所得方位角与目标数据库中的标准 RCS 曲线进行比较,用一元线性回归函数获得该目标的 RCS 曲线。

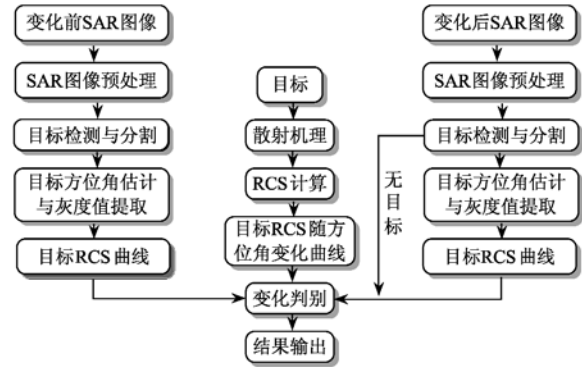


图 2 基于 RCS 的 SAR 图像点目标变化检测流程图

Fig. 2 Flow chart of SAR image point target change detection based on RCS curve

目标变化前的时刻为 t_1 , 此时获得的 RCS 与目标标准库 RCS 曲线之间存在某种相应或相似关系,假设为线性关系,则

$$\sigma = a + b\alpha_0 \quad (13)$$

式中 σ 为时刻 t_1 的 RCS, α_0 为目标曲线库的 RCS, a 和 b 为未知参数,称 b 为这个一元线性回归函数的回归系数, a 和 b 可以通过最小二乘法估计。计算公式如下:

$$\begin{cases} \hat{a} = \bar{\sigma}_a - \hat{b}\bar{\alpha}_0 \\ \hat{b} = \frac{\sum_{k=1}^M (\sigma_a(k) - \bar{\sigma}_a)(\alpha_0(k) - \bar{\alpha}_0)}{\sum_{k=1}^M (\sigma_a(k) - \bar{\sigma}_a)^2} \end{cases} \quad (14)$$

在式(14)中, $\sigma_a(k)$ 和 $\alpha_0(k)$ 分别表示同一方位角时目标在时刻 t_1 和数据库中的 RCS 值, $\bar{\sigma}_a$ 和 $\bar{\alpha}_0$ 分别表示它们相应的 RCS 平均值, M 是获得不同方位角目标 RCS 值的个数。关键在于 t_1 时所获得的图像数目是有限的,尤其是当图像只有一幅时。如果 t_1 只获得了一幅图像,则系数 $a = 0$, b 为对应角度 RCS 值的比值,由式(13)可以近似计算目标所有方位角 t_1 时刻的近似 RCS 值。

(3) 获得目标变化后的 RCS 曲线。对于发生变化后的目标,如果目标或目标的部分存在,用同样的方法可求出目标变化后时刻 t_2 的 RCS 曲线,把 t_1 和 t_2 相同方位角的 RCS 值进行差值或比值,再跟预定的阈值进

行比较,就可获得目标变化等级。如果目标不存在,说明它已经发生了巨大的变化,彻底消失了。

3 实验结果与分析

实验所用的数据库是部分 MSTAR 数据库中 BMP2 坦克的 SAR 图像。MSTAR 数据是由美国 DARPA/AFRL MSTAR 项目组提供的实测 SAR 地面静止军用目标数据。它是由圣地亚国家实验室分别在 1995 年和 1996 年利用 X 波段、HH 极化方式、0.3 m×0.3 m 高分辨率聚束式 SAR 采集而得,目标图像大小为 128×128。其中,图 3 为部分 BMP2 坦克光学和 SAR 图像。MSTAR 数据库主要针对几种军事目标做的实验,每次起始方位角不一样,然后每次旋转 5°或 10°,这样重复多次后,就可以获得某个目标在 0~360°之间的 SAR 图像。以此建立模板数据库用于目标自动识别,图 4 是 BMP2 的一组实验数据,具体情况如表 1 所示,图 5 是图 4 对应的灰度值曲线图,近似于 BMP2 在该条件下的 RCS 曲线,在实验中我们把它当作 RCS 曲线处理。在图 5 中,纵坐标是功率图像灰度值乘以一个对应因子后再化为分贝。

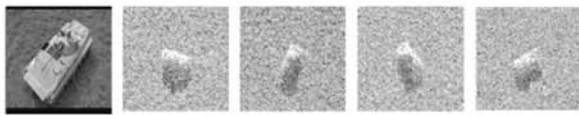


图 3 BMP2 的光学及部分 SAR 图像

Fig.3 Optical images and part SAR images of BMP2

本文针对不同情况进行了仿真实验,实验目标是 BMP2,俯角为 17 度。第一个实验是目标变化前后均处于相同或相近的方位角,如图 6 所示。图 6 是目标变化前后均处于 135 度的变化检测实验。其

中,图 6(a)是变化前的图像,图 6(b)是变化前的目标检测结果,图 6(c)是变化后的图像,图 6(d)是变化后的目标检测结果。图 7 是目标变化前 t_1 和变化后 t_2 均处于 135 度时的 RCS 曲线和标准库的对比图。从图 7 中可以获得目标在方位角 135 度时变化前后 RCS 差值为 -6.2864dB,转换成灰度值为 29.63。该实验表示目标发生了变化。

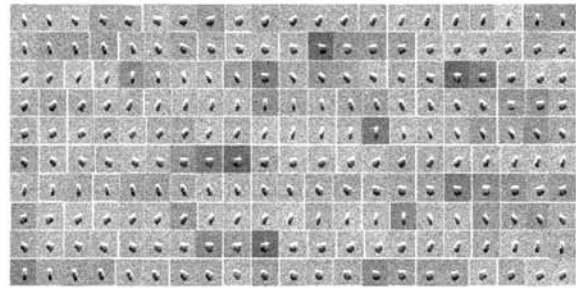


图 4 BMP2 在俯角 17 度不同方位角下的 SAR 图像
Fig.4 SAR images of BMP2 at different azimuth under depression angle 17 degree

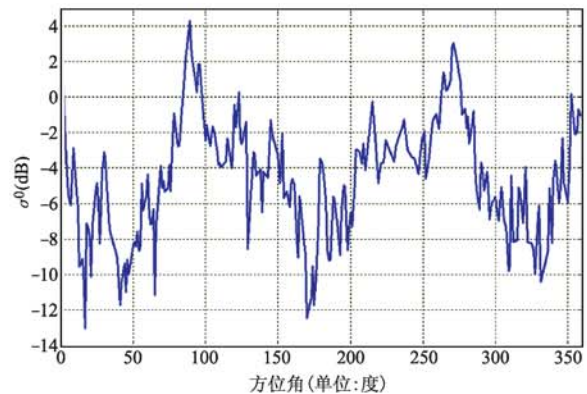


图 5 图 4 中 SAR 图像目标所对应的 RCS 曲线
Fig.5 Corresponding RCS curve of SAR image target in Fig.4

表 1 部分 MSTAR 实验数据库

Table 1 Part MSTAR experimental data

目标类型	俯角 15 度			俯角 17 度			总数
	第一组	第二组	第三组	第一组	第二组	第三组	
BMP2	195	196	196	233	232	233	1285

第二个实验是目标变化前后处于不同的方位角。图 8 为目标在 230 度时的变化前后检测结果图。其中,图 8(a)是变化前的图像,图 8(b)是变化前的目标检测结果,图 8(c)是变化后的图像,图 8(d)是变化后的目标检测结果。图 9 为目标变化前后处于不同的方位角的检测结果图。其中,图 9(a)

是变化前的处于 135 度的图像,图 9(b)是变化前的目标检测结果,图 9(c)是变化后处于 230 度的图像,图 9(d)是变化后的目标检测结果。图 10 为目标变化前 t_1 方位角处于 135 度和目标变化后 t_2 方位角处于 230 度的 RCS 曲线及标准库曲线对比图。从图 9 中可以获得目标在方位角 230 度时变化前后 RCS

差值为 -10.1911dB, 转换成灰度值为 45.639。实验二也表明 RCS 可以用于目标的毁伤检测。

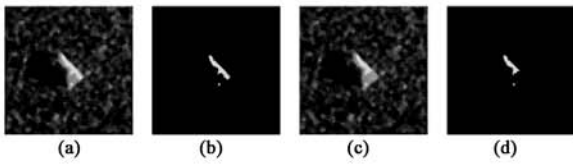


图 6 变化前后方位角均为 135 度

Fig.6 Both 135 degree azimuth for before and after changes

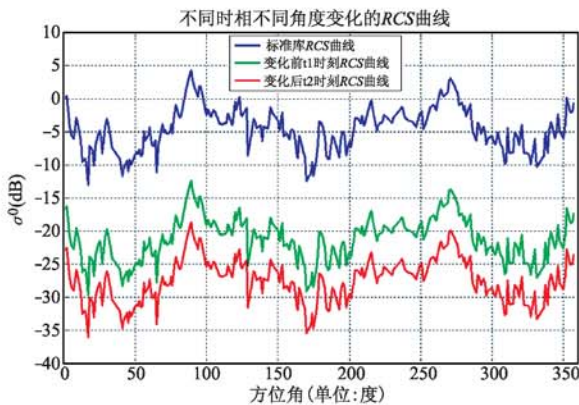


图 7 方位角 135 度变化前后 RCS 曲线图

Fig.7 RCS curve before and after change under 135 degree azimuth

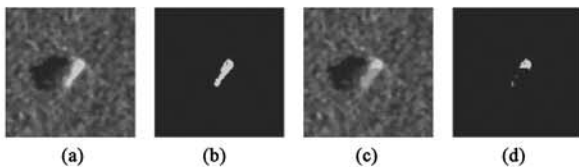


图 8 变化前后方位角均为 230 度

Fig.8 Both 230 degree azimuth for before changes and after changes

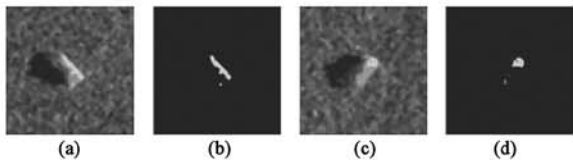


图 9 变化前方位角为 135 度而变化后方位角为 230 度
Fig.9 135 degree azimuth before change and 230 degree azimuth after change

4 结论

本文针对低分辨率 SAR 图像中点目标的变化检测进行了深入的研究。由于 SAR 图像与地物目标后向散射特性之间存在对应关系, 所以从 SAR 图

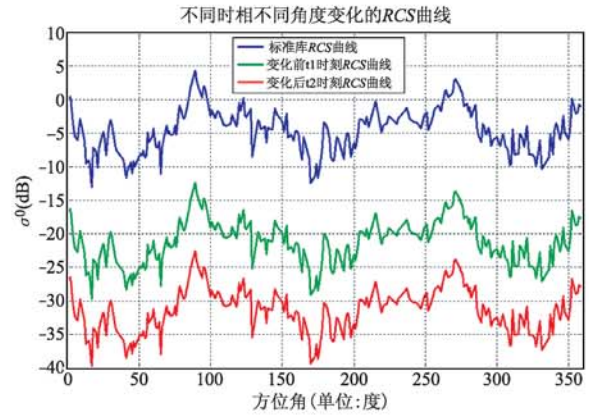


图 10 BMP2 在俯角 17 度变化前方位角 135 度变化后方位角 230 度的 RCS 曲线图

Fig.10 RCS curves of before change 135 degree azimuth and after change 230 degree azimuth

像的变化可以推出目标散射特性发生了变化, 进一步推出目标的变化情况。RCS 反映的是目标的零维散射特性, 通过 RCS 曲线的变化, 不仅可以获得目标的变化信息, 而且还可以识别目标的真伪情况。下一步的工作是研究高分辨率的 SAR 图像目标变化检测问题。

参考文献:

- [1] Oliver C, Quegan S. Understanding synthetic aperture radar images. Artech House, Boston·London, 1998.
- [2] 郭华东, 等著. 雷达对地观测理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000. [GUO Hua-dong, et al. Radar for Earth Observation: Theory and Application [M]. Beijing: Science Publishing House, 2000.]
- [3] 刘代志, 黄世奇, 苏娟. 一种新的 SAR 图像目标检测方法[J]. 宇航学报, 2007, 28(5): 1266 - 1272. [LIU Dai-zhi, HUANG Shi-qi, SU Juan. A novel target detection approach for SAR images[J]. Chinese Journal of Astronautics, 2007, 28(5): 1266 - 1272.]
- [4] 张静, 王国宏, 杨智勇. 基于局部特征核主成分分析的 SAR 图像识别方法[J]. 宇航学报, 2008, 29(3): 995 - 1001. [ZHANG Jing, WANG Guo-hong, YANG Zhi-yong. SAR images recognition based on local feature kernel principal component analysis[J]. Chinese Journal of Astronautics, 2008, 29(3): 995 - 1001.]
- [5] Bovolo F, Bruzzone L, Marconcini M. A novel approach to unsupervised change detection based on a semisupervised SVM and a similarity measure[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(7): 2070 - 2082.
- [6] 陈富龙, 张红, 王超. SAR 变化检测技术发展综述[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(1): 109 - 115. [CHEN Fu-long, ZHANG Hong, WANG Chao. The art in SAR change detection a systematic review[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22(1): 109 - 115.]

- [7] Castellana L, D'Addabbo A, Pasquariello G. A composed supervised/unsupervised approach to improve change detection from remote sensing[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2007(28):405 - 413.
- [8] Bovolo F, Bruzzone L. A detail-preserving scale-driven approach to change detection in multitemporal SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(12): 2963 - 2972.
- [9] Bruzzone L, Prieto D F. Automatic analysis of the difference image for unsupervised change detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(3): 1171 - 1182.
- [10] Eric J M, Rignot, Jakob J, van Zyl. Change detection techniques for ERS - 1 SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(4): 896 - 906.
- [11] 江利明, 廖明生, 张路, 林挥. 顾及空间邻域关系的多时相 SAR 影像变化检测[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2006, 31(4): 312 - 315. [JIANG Li-ming, LIAO Ming-sheng, ZHANG Lu, LIN Hui. Change detection in multitemporal SAR images using MRF models[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(4): 312 - 315.]
- [12] 张辉, 王建国. 一种基于主分量分析的 SAR 图像变化检测算法[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(7): 1727 - 1730. [ZHANG Hui, WANG Jianguo. A SAR image change detection algorithm based on principal component analysis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(7): 1727 - 1730.]
- [13] Chris W, Patricia W, Alan P, Trevor M. Coherent change detection using statistical techniques[C]. 3rd EMRS DTC Technical Conference - Edinburgh, 2006, A25.
- [14] Inglada J, Mercier G. A new statistical similarity measure for change detection in multitemporal SAR images and its extension to multiscale change analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(5): 1432 - 1445.
- [15] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. [RUAN Ying-zheng. *Radar Cross Section and Microwave Absorption Technology* [M]. Beijing: Defence Industry Publishing House, 2000.]

作者简介:黄世奇(1974 -),男,博士后,讲师,研究方向为遥感图像处理,SAR 成像与目标检测与识别,地理信息系统,智能信号处理。

通信地址:西安市第二炮兵工程学院 901 室(710025)

电话:13259986967

E-mail:huang - shi - qi@163.com

SAR Image Point Target Change Detection Based on RCS Curves

HUANG Shi-qi, LIU Dai-zhi, CAI Xin-hua, WANG Shi-cheng

(The Second Artillery Institute of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: If the physical structure and surface roughness of ground objects or object classes change, backscattering energy will produce corresponding changes and radar cross section (RCS) also changes. It leads to the brightness and color changes of synthetic aperture radar (SAR) images. So this paper proposes a new SAR image target change detection algorithm which is based on RCS curve. The proposed algorithm is different from other change detection algorithms that are based on image field. It can obtain the change information through target scattering characteristics, which avoids some errors brought by the error registration between multi-temporal SAR images. Finally, some test experiments perform with SAR image and the experimental results show that the method is feasible.

Key words: RCS curve; SAR image; Target change detection; Scattering feature