

# 基于 SAR 图像的目标散射中心特征提取方法研究\*

计科峰, 匡纲要, 粟毅, 郁文贤

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 针对 SAR ATR 需要, 基于属性散射中心模型, 研究了从 SAR 图像提取目标散射中心特征的方法。该方法首先从 SAR 图像分割出包括单个散射中心响应的目标区域, 然后判断该区域对应的散射中心的类型, 最后再采用相应的参数模型进行参数初值选择和数字优化, 从而得到对应该区域的目标散射中心特征。通过循环执行上面的步骤, 就可以从 SAR 图像提取出目标所有散射中心特征。仿真结果表明, 该算法具有良好的估计性能。

**关键词:** 合成孔径雷达; 特征提取; 散射中心

**中图分类号:** TN957.51 **文献标识码:** A

## Research on the Extracting Method of the Scattering Center Feature from SAR Imagery

Ji Ke-feng, Kuang Gang-yao, Su Yi, Yu Wen-xian

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

**Abstract:** To meet the need of SAR ATR, based on attributed scattering center model, the extracting method of the scattering center feature from SAR imagery is studied. The method first extracts region including only one scattering center from SAR image by segmentation. Then, the type of the scattering center of the region is chosen. Finally, the initialized values of the parameter are selected and digital optimization is executed by the utilization of the corresponding parameter model of the scattering center, and the scattering center of the target in this region is gotten. By following these steps repeatedly, all scattering centers of the target can be extracted. Results from simulation show that the algorithm has good estimate performance.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar(SAR); feature extraction; scattering center

散射中心是高频区 SAR 目标识别的一个重要特征<sup>[1]</sup>。近年来, 人们对描述目标散射的“点”散射模型<sup>[2~3]</sup>提出了一系列改进<sup>[4~9]</sup>, 其中, 最有代表性的当属 Randolph L. Moses 等提出的“属性”(Attributed)散射中心模型<sup>[7~9]</sup>。目标散射中心的特征提取问题本质是一个参数估计问题, 对于 SAR ATR 应用来说, 基于图像域<sup>[9~11]</sup>的方法比基于频率域<sup>[2~8, 12~14]</sup>的方法更直接, 特别是对于特征参数维数比较高的“属性”散射中心模型, 采用图像域的方法能大大降低特征提取问题的复杂性<sup>[9~11]</sup>。本文在文献<sup>[9~11]</sup>的基础上, 假定 SAR 图像的分辨率足够高, 提出了一种基于图像域的自动化程度较高的目标散射中心特征提取方法。由此得到的结论, 只需稍作改进就可应用到实际的 SAR 图像上。

### 1 “属性”散射中心模型<sup>[7~9]</sup>

“属性”散射中心模型是 Randolph L. Moses 等基于几何绕射理论和物理光学理论解提出的描述高频区复杂目标散射特性的参数模型, 其具体形式如下:

$$E(f, \phi, \theta) = \sum_{i=1}^n E_i(f, \phi, \theta_i) \quad (1)$$

式中:  $\theta = [\theta_1^T \quad \theta_2^T \quad \dots \quad \theta_n^T]^T$ ,  $n$  为目标上散射中心的数目。

\* 收稿日期: 2002-09-06

基金项目: 国家部委资助项目(41322020401)

作者简介: 计科峰(1974-), 男, 博士生。

$$E_i(f, \phi; \theta_i) = A_i \left( \frac{if}{fc} \right)^{\alpha_i} \cdot \exp \left\{ \frac{-j4\pi f}{c} (x_i \cos \phi + y_i \sin \phi) \right\} \operatorname{sinc} \left[ \frac{2\pi f}{c} L_i \sin(\phi - \phi'_i) \right] \cdot \exp(-2\pi f y_i \sin \phi) \quad (2)$$

式(2)中  $E_i$ —目标上单个散射中心的后向散射回波,  $f$ —频率,  $\phi$ —方位角,  $f_c$ —中心频率,  $c$ —光速, 参数集  $\theta_i = [x_i, y_i, \alpha_i, \gamma_i, \phi'_i, L_i, A_i]$ , 其中  $A_i$ —复幅度,  $x_i, y_i$ —散射中心距离向、方位向的位置。  $\alpha \in \{-1, -1/2, 0, 1/2, 1\}$ , 表示频率依赖, 当  $L_i = \phi'_i = 0$  时, 对应局部散射中心,  $\gamma_i$  表示散射中心的方位角依赖性; 当  $\gamma_i = 0$  时, 表示分布散射中心, 它对方位角的依赖由散射中心方位向的物理长度  $L_i$  和方位角  $\phi'_i$  表征。

## 2 基于 SAR 图像的目标散射中心特征提取方法<sup>[9~11]</sup>

SAR 目标回波的频率域数据是按频率  $f$  和角度  $\phi$  的间隔变化进行采集的极坐标格式的数据, 其数据范围对应一扇形区域<sup>[11,12,16]</sup>, 成像观测角  $\phi \in [-\phi_m/2, \phi_m/2]$ , 频率  $f \in [(1-\beta/2)f_c, (1+\beta/2)f_c]$ , 其中  $\beta$  为相对带宽, 定义为带宽  $B$  和中心频率  $f_c$  之比。为了成像, 需要将极坐标  $(f, \phi)$  下的复测量数据  $D(f, \phi)$ , 插值到直角坐标  $(f_x, f_y)$  下, 插值后得到一个频域均匀分布的  $M \times N$  的数据阵列  $D(f_x, f_y)$ , 其中:  $f_x \in [(1-\beta/2)f_c, (1+\beta/2)f_c]$ ,  $f_y \in [-f_c \sin(\phi_m/2), f_c \sin(\phi_m/2)]$ 。为了得到对应的 SAR 图像, 一般还要进行加窗、补零等处理, 最后再通过二维逆傅立叶变换, 得到一个  $M_z \times N_z$  的复图像矩阵  $D(x, y)$ <sup>[11,12]</sup>。

基于 SAR 图像的目标散射特征中心提取问题可概括为: 给定 SAR 图像  $D(x, y)$ , 估计最拟合该图像的目标散射中心的数目和参数集  $\theta$ 。假定频率域测量数据  $D(f_x, f_y)$  可由一个与模型精确匹配的散射响应和因子  $E(f_x, f_y; \theta)$  以及复白高斯噪声  $N(f_x, f_y)$  因子近似<sup>[11,12]</sup>。

$$D(f_x, f_y) = E(f_x, f_y; \theta) + N(f_x, f_y) \quad (3)$$

理论上可由最大似然估计很容易得到上面参数估计问题的解。但实际上, 该基于频率域数据的估计算法在实际实现起来非常困难。假定 SAR 成像过程可用一个线性算子  $B$  来表示, 并且, 为了表示的方便, 将  $D(f_x, f_y)$  化为矢量  $d$ , 同样将  $E(f_x, f_y)$  化为矢量  $e$ , 于是有:

$$d = B \cdot e = B \cdot [e(\theta) + n] = B \cdot \left[ \sum_{i=1}^n e(\theta_i) \right] + n = \sum_{i=1}^n B \cdot e(\theta_i) + n = \sum_{i=1}^n e(\theta_i) + n = e(\theta) + n \quad (4)$$

(4)式中,  $n \sim N(0, \Sigma = \sigma^2 I)$ ,  $e(\theta)$  对应模型因子;  $n \sim N(0, \Sigma = B \Sigma_B^H)$ , 是一个高斯色噪声矢量,  $e(\theta_i)$  对应单个散射中心的模型;  $e(\theta_i)$  对应单个散射中心模型形成的图像,  $e(\theta)$  是确定性的, 对应整个模型形成的图像。于是可由下式得到参数  $\theta$  的最大似然估计。

$$\theta_{ML} = \arg \min_{\theta} [d - e(\theta)]^H \Sigma^{-1} [d - e(\theta)] \quad (5)$$

根据分辨率足够高的情况下目标单个散射中心响应聚集在图像中某些小的孤立的区域内这一事实, 把整个图像分割成几个小的区域, 每个区域对应于一个散射中心的响应, 然后再对这些小的区域分别进行处理。首先从图像提取包括第  $k$  个散射中心响应的能量较高的区域  $R$ , 令  $d_R$  表示该区域中的图像像素值,  $\theta_k$  对应于第  $k$  个散射中心的参数  $\theta_k = [x_k, y_k, \alpha_k, \gamma_k, \phi'_k, L_k, A_k]$ ,  $e(\theta_k)$  表示将  $\theta_k$  代入参数模型得到的图像分割, 对区域  $R$  应用极大似然标准, 得到下面的近似极大似然估计准则:

$$\theta_{k, AML} = \arg \min_{\theta_k} [d_R - e_R(\theta_k)]^H \Sigma_R^{-1} [d_R - e_R(\theta_k)] \quad (6)$$

与直接利用频域数据的方法相比, 基于图像域的方法显然大大降低了估计问题的复杂性。

从高分辨 SAR 图像提取目标散射中心特征主要包括: 图像分割、散射中心结构判别、参数初始化以及数字优化等步骤。图像分割是为了从 SAR 图像提取出包括目标单个散射中心响应的能量较高的区

域; 结构判别是为了区分散射中心的结构, 判定它是属于局部散射中心或分布散射中心, 从而确定对该散射中心要估计哪些参数; 参数初始化和参数优化是为了得到较好的散射中心特征参数估计。

## 2.1 图像分割<sup>[9~11]</sup>

采用基于序贯处理的水线算法 (Watershed) 进行图像分割, 以提取图像中能量较高的区域, 然后对该区域进行特征提取处理, 在处理完该分割之后, 令它的像素值为 0, 再对新得到的图像进行分割, 以提取下一个能量较高的区域, 并对它进行特征提取处理, 以此类推, 直到已提取的散射中心数目等于用户定义的值, 或要处理的图像像素的幅度低于用户定义的某个门限, 或者由已提取的散射中心参数重构的 SAR 图像的能量和原始 SAR 图像的能量之间的差别小于某个门限。

## 2.2 参数规则化<sup>[11]</sup>

在式(2)的模型中,  $x_i, y_i, L_i$  的单位是 m,  $\phi_i$  的单位是 $^\circ$  (或 rad),  $\gamma_i$  的数量级一般比较小( $10^{-10}$ 左右), 为了直接利用 SAR 图像数据并提高参数估计算法的稳定性, 需要对参数进行规则化。

定义如下的归一化参数:

$$x_p = x/p_x \quad y_p = y/p_y \quad L_p = L/p_y \quad (7)$$

$$\gamma_p = \gamma \cdot 4\pi f_c \sin(\phi_m/2) \quad \phi_p = \frac{\phi}{\phi_m/2} \quad (8)$$

式(7)、(8)中因子  $p_x = \frac{1}{f_c} \cdot \frac{c}{2\beta} \cdot \eta_x$ ,  $p_y = \frac{1}{f_c} \cdot \frac{c}{4\sin(\phi_m/2)} \cdot \eta_y$  分别对应图像上每个像素间的距离向和方向向尺寸, 因子  $\eta_x = (M-1)/(M_z-1)$ ,  $\eta_y = (N-1)/(N_z-1)$  对应于 SAR 成像过程中的补零效应。

经过归一化后,  $x_p, y_p$  以及  $L_p$  的单位是像素,  $\phi_p$  的范围是 $(-1, +1)$ , 它表示方位角和最大孔径的比,  $\gamma_p$  对应于幅度随方位角的变化因子, 它的数量级约为  $10^{-1}$ 。

同样对笛卡尔频率坐标进行归一化:

$$f_{xn} = f_x/f_c \quad f_{yn} = f_y/f_c \quad f_2 = f_{yn}/[2\sin(\phi_m/2)] \quad (9)$$

归一化后  $f_{xn} \in [1-\beta/2, 1+\beta/2]$ ,  $f_{yn} \in [-\sin(\phi_m/2), \sin(\phi_m/2)]$ ,  $f_2 \in [-1/2, 1/2]$ 。

利用上面的归一化参数, 得到如下的规则化参数散射模型:

$$E(f_{xn}, f_{yn}) = A \cdot \left[ j \sqrt{(f_{xn}^2 + f_{yn}^2)} \right]^\alpha \cdot \exp \left[ -j2\pi \left[ \frac{f_{xn}}{\beta} x_p \eta_x + f_2 y_p \eta_y \right] \right] \cdot \text{sinc} \left\{ \frac{\pi \sqrt{(f_{xn}^2 + f_{yn}^2)} L_p \eta_y}{2\sin(\phi_m/2)} \sin \left[ \arctan \left( \frac{f_{yn}}{f_{xn}} \right) - \phi_p \frac{\phi_m}{2} \right] \right\} \cdot \exp(-f_2 \gamma_p) \quad (10)$$

式(10)的规则化参数模型和原始的参数模型实质上是等价的, 只是调整了各个参数之间的相对比例关系, 将由 SAR 图像估计散射中心的  $A, x, y, \alpha, \gamma, \phi, L$  参数问题转为估计  $A, x_p, y_p, \alpha, \gamma_p, \phi_p, L_p$ , 从而可以更直接地利用 SAR 图像数据并提高估计算法的数字稳定性。

## 2.3 结构选择<sup>[10, 11]</sup>

根据 SAR 图像上分布散射中心的响应在方位向的尺寸要比局部散射中心大这一事实, 可得到如下的基于图像的结构选择算法: 首先从分割得到的区域提取一条穿过峰值像素的方位向像素样本, 得到一个较小的样本矢量并对它进行归一化, 然后对该归一化响应进行最小二乘拟合, 得到抛物线  $ax^2 + bx + c$  的参数  $(a, b, c)$ 。接着, 选择用于估计散射中心方位向响应宽度的门限  $v$ 。然后求解方程:  $ax^2 + bx + c = v$ , 得到它的两个根  $x_1, x_2$ , 两者之间的距离对应于散射中心响应的  $-3\text{dB}$  宽度,  $W = |x_1 - x_2|$ 。如果  $W$  大于某个门限, 则表明该响应对应于分布散射中心; 否则对应于局部散射中心。

## 2.4 初值选择<sup>[10, 11]</sup>

式(6)的最小化问题的代价函数是高维、非凸的, 要得到它的总体最小值, 起始点的选择非常关键, 这里利用参数模型和 SAR 图像特性进行初值选择。

为了保证优化问题的数字稳定性, 从现在开始利用前面的归一化参数模型, 归一化参数集是  $\{x_p, y_p, \alpha, \gamma_p, \phi_p, L_p, A\}$ 。  $x_p, y_p$  的初始化可通过计算由分割得到的区域的质心  $x_p^{init}, y_p^{init}$  得到。将局部

散射模型中  $y_p$  初始化为0。对分布的模型参数  $\phi_p, L_p$ , 可以利用参数模型得到较好的初值估计。在式(10)的规则化参数模型中, 令  $y_p = 0$ , 并对它取幅度得到:

$$|E(f_{x_n}, f_{y_n})| = A \left| \sqrt{(f_{x_n}^2 + f_{y_n}^2)} \right|^\alpha \left| \text{sinc} \left\{ \frac{\pi \sqrt{(f_{x_n}^2 + f_{y_n}^2)} L_p \Gamma_y}{2 \sin(\phi_m/2)} \cdot \sin \left[ \arctan \left( \frac{f_{y_n}}{f_{x_n}} \right) - \frac{\phi_p \phi_m}{2} \right] \right\} \right| \quad (11)$$

在  $f_n = \sqrt{(f_{x_n}^2 + f_{y_n}^2)}$  固定的情况下, (11) 式是  $|\text{sinc}(\cdot)|$  函数的形式, 当  $\arctan(f_{y_n}/f_{x_n}) = \phi_p \cdot \phi_m/2$  时得到极大值, 又  $\phi = \arctan(f_{y_n}/f_{x_n})$ , 从而有  $\frac{\phi}{\phi_m/2} = \phi_p$ , 这表明当归一化方位角  $\frac{\phi}{\phi_m/2}$  等于参数  $\phi_p$  时, 频域数据的幅度取极大值。

由  $\text{sinc}$  函数的主瓣宽度可得到  $L_p$  的初始估计。在(11)式中令:  $\phi = \phi_p \cdot \phi_m/2$ , 得到:

$$|E(f_n)| = |A| \cdot |f_n|^\alpha \cdot \left| \text{sinc} \left[ \frac{\pi L_p \Gamma_y}{2 \sin(\phi_m/2)} \right] f_n \sin(\phi) \right| \quad (12)$$

令  $f_n \sin(\phi) = f'_y = \Delta v$ , 这里  $\Delta$  是  $f_{y_n}$  网格上两个相邻点之间的间隔,  $v$  是整数, 当  $\phi = 0$  时为0。假设  $f_n \approx f_{x_n}$ , 则在某一固定  $f_{x_n}$  下的频率模型幅度化为:

$$|E(v)| = K \cdot \left| \text{sinc} \left[ \frac{\pi L_p \Gamma_y}{2 \sin(\phi_m/2)} \right] \Delta v \right| \quad (13)$$

这里  $K$  为常数, 如果只考虑  $\text{sinc}$  函数的主瓣, (13) 式可进一步化为:

$$|E(v)| = K \cdot \text{sinc} \left[ \frac{\pi L_p \Gamma_y}{2 \sin(\phi_m/2)} \Delta v \right] \cdot \left| \left[ \frac{\pi L_p \Gamma_y}{2 \sin(\phi_m/2)} \right] \right| \ll \pi \quad (14)$$

在  $v = 0$  附近进行 Taylor 展开, 将  $\text{sinc}$  函数的主瓣近似为二次函数。

$$\text{sinc} \left[ \frac{\pi L_p \Gamma_y}{2 \sin(\phi_m/2)} \Delta v \right] \approx 1 - \frac{1}{6} \cdot \left[ \frac{\pi L_p \Gamma_y}{2 \sin(\phi_m/2)} \Delta \right]^2 v^2 \quad (15)$$

因此, 如果用抛物线  $f(v) = 1 + av^2$  去拟合主瓣, 就可由参数  $a$  解出  $L_p$ 。实际应用中先将分割后的图像变回到频率域, 再对  $f_c$  附近 10% 相对带宽内某一固定  $f_n$  下的频率域数据进行平均, 其幅度数据矢量是一个类  $\text{sinc}$  函数, 假定该矢量位于 -1 和 1 之间, 那么由峰值的相对位置可得到  $\phi_p^{init}$ , 然后对该  $\text{sinc}$  函数进行抛物线拟合, 可解出  $L_p^{init}$ 。图 1 给出了中心频率  $f_c$  附近 10% 带宽内的几个方位向响应及其平均响应。图 2 给出了归一化的平均响应和采用上面的拟合方法得到的抛物线的曲线图。另外, 图 2 中还给出了确定  $\phi_p^{init}$  的示意图。

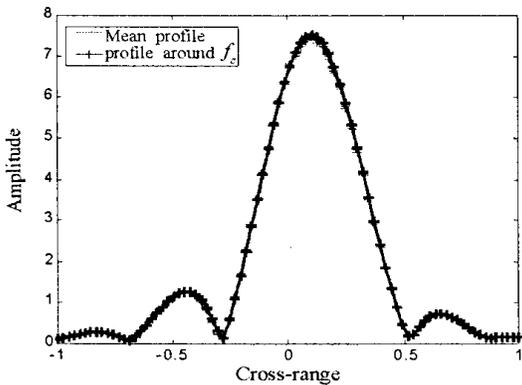


图 1  $f_c$  附近 10% 带宽内的几个方位向响应及平均响应

Fig. 1 A few cross-range responses in the 10% relative bandwidth around  $f_c$  and their mean response

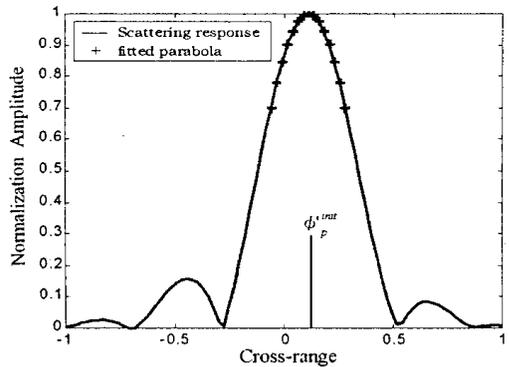


图 2 归一化平均响应及抛物线拟合结果

Fig. 2 Normalized mean response and the result of parabolic fitting

参数  $\alpha$  是离散的, 它取小于或等于 1 的 1/2 的倍数。在高频区,  $\alpha < 0$  的散射响应是很弱的, 在实际中可忽略, 因此, 这里假定  $\alpha$  的取值为  $\{0, 1/2, 1\}$ 。在给定其它参数初值估计的情况下, 计算三个可能的  $\alpha$  值的代价函数, 最小的代价函数对应的  $\alpha$  值选为  $\alpha^{init}$ 。另外, 也可将  $\alpha$  视为连续值, 对它进行优化, 然后再将优化结果映射到一个离散值<sup>[9-12]</sup>。由于幅度  $A \in C$  作为线性因子出现在模型中, 可直接得到

它的最小二乘估计, 因此不需要对它进行数字优化和初始化。

### 2.5 参数优化<sup>[11, 12]</sup>

在得到初值后, 代入式(6), 通过叠代的最小化过程可得到对应的散射中心特征参数的近似最大似然估计。由于  $A$  在模型中是一个线性因子, 可得到它的最小二乘估计的解析解:

$$A_k = \frac{s_R(\theta_k)^H \cdot d_R}{s_R(\theta_k)^H \cdot s_R(\theta_k)} \quad (16)$$

这里,  $s_R(\theta_k)$  表示  $\theta_k$  中当  $A_k = 1$  时得到的目标响应。于是式(6)要最小化的代价函数化为:

$$J(\theta_k) = \left[ d_R - \frac{s_R(\theta_k)^H \cdot d_R}{s_R(\theta_k)^H \cdot s_R(\theta_k)} s_R(\theta_k) \right]^H \Sigma_R^+ \left[ d_R - \frac{s_R(\theta_k)^H \cdot d_R}{s_R(\theta_k)^H \cdot s_R(\theta_k)} s_R(\theta_k) \right] \quad (17)$$

因此, 在数字最小化过程中对局部散射中心需要迭代的参数只有:  $\{x_p, y_p, \gamma_p\}$ , 对分布散射中心有  $\{x_p, y_p, \phi_p, L_p\}$ 。该多参数迭代最小化问题可由二次三次混合搜寻过程的 BFGS Quasi-Newton 方法实现<sup>[15]</sup>。

## 3 实验结果与性能分析

在散射中心模型中, 取  $f_c = 9.6\text{GHz}$ ,  $B = 500\text{MHz}$ , 则距离向分辨率  $R_x = 0.3\text{m}$ , 选择适当的  $\phi_m$  使得方位向分辨率  $R_y = 0.3\text{m}$ , 选择  $M = N = 84$ 。对得到的频率-方位角域极坐标数据进行坐标转换、插值、加窗、补零及 2D-IFFT, 得到一个  $128 \times 128$  的图像矩阵。

表 1 散射中心参数的取值

Tab. 1 Values of scattering centers

散射中心 \ 参数	$A$	$x(\text{m})$	$y(\text{m})$	$\alpha$	$\gamma_p$	$L(\text{m})$	$\phi(^{\circ})$
$l_1$	3	-1.6	1.6	1	0	—	—
$l_2$	3	0	0	0	0.3	—	—
$d_1$	8	2.8	-2.8	0.5	—	1.5	0.1719
$d_2$	6	4	-1.6	1	—	0.8	0.8594

采用上面的图像模拟方法和想定, 模拟一个包括表 1 中四个散射中心(两个局部散射中心、两个分布散射中心)的含噪 SAR 图像, 假定噪声是高斯白噪声, 其  $\sigma_n^2 = 26.8156$ , 定义信噪比为信号能量与噪声方差之比, 则其对应的信噪比  $\text{SNR} \approx -7\text{dB}$ , 得到图 3 所示的含噪 SAR 图像。

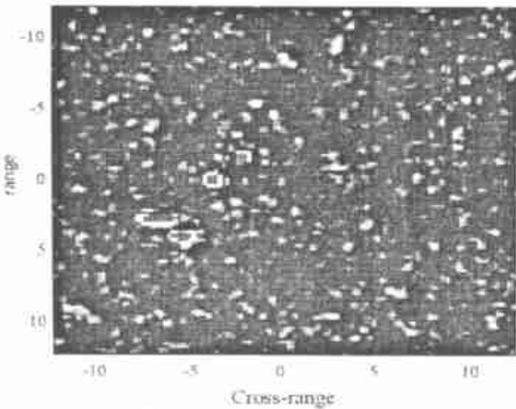


图 3 模拟的四个散射中心的含噪 SAR 图像

Fig. 3 Simulated SAR image of four scattering centers

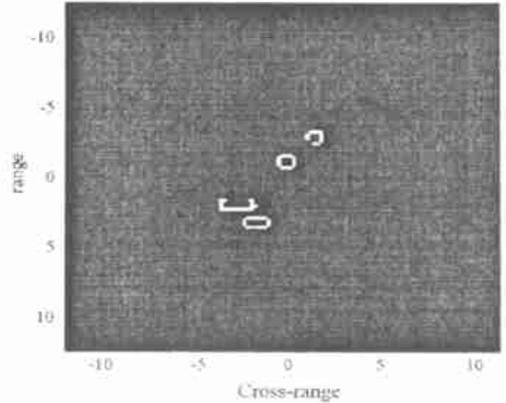


图 4 重建的包括四个散射中心的 SAR 图像

Fig. 4 Reconstructed SAR image of four scattering centers

采用前面的参数估计方法, 利用某次实验得到的参数估计结果, 得到如图 4 所示的重建的 SAR 图像。从上面的仿真结果可看到, 本文算法具有较好的估计性能, 它从含噪的 SAR 图像中正确地提出了四个散射中心, 较好地重建了原始图像。

为了进一步考察该估计算法的统计性能, 计算每个参数估计的克拉美罗下界<sup>[12, 16]</sup> (CRB), 然后进行 100 次重复实验, 得到每个参数的平均估计方差, 结果如表 2 所示。由表 2 可看到, 对每个散射中心的每个参数估计来说, 它的平均估计方差和 CRB 是很接近的, 说明该估计算法具有较好的统计性能。

表 2 四个散射中心参数估计的 CRB 和平均估计方差

Tab. 2 Mean parameter estimation variances and CRB of four scattering centers

$l_1$	CRB	估计方差	$l_2$	CRB	估计方差
$x$ (m)	4.0123e-006	6.7098e-006	$x$ (m)	1.9352e-005	5.7412e-005
$y$ (m)	5.6407e-006	9.4532e-006	$y$ (m)	3.1947e-005	6.9302e-005
$y_p$	0.0025	0.0098	$y_p$	0.0025	0.0068
$d_1$	CRB	估计方差	$d_2$	CRB	估计方差
$x$ (m)	4.1865e-006	7.5234e-006	$x$ (m)	4.2829e-006	7.9853e-006
$y$ (m)	3.3549e-005	6.2678e-005	$y$ (m)	1.7571e-005	4.5567e-005
$L$ (m)	1.4821e-004	3.4576e-004	$L$ (m)	1.3829e-004	2.9999e-004
$\phi$ ( $^\circ$ )	1.8496e-005	5.8992e-005	$\phi$ ( $^\circ$ )	1.5105e-004	4.0231e-004

## 4 结束语

本文给出了一种基于属性散射中心模型的 SAR 图像目标散射中心特征提取方法, 详细研究了图像分割、结构选择、参数初始化和数字优化等步骤, 仿真结果表明该算法具有较好的估计性能。另外, 本文的研究中, 假定目标 SAR 图像的分辨率足够高, 从而能够从 SAR 图像提取出只包含目标上单个散射中心响应的区域, 对于实际的大多数 SAR 图像来说, 该假设过于严格, 实际情况是很难由图像分割得到只包含一个散射中心的区域的, 但是, 对实际 SAR 图像, 仍然可以借鉴本文的思想, 首先通过图像分割的方法, 从图像中提取出只包括少数几个散射中心的区域, 然后再对该小的区域借鉴频率域目标散射中心特征提取方法<sup>[12]</sup>进行特征提取处理, 同样可以有效降低特征提取问题的复杂性, 目前这方面的研究正在进行当中。

## 参考文献:

- [1] 汪茂光. 几何绕射理论(第二版)[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.
- [2] Hurst M P, M àtra R. Scattering Center Analysis via Prony's Method[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1987, AP(35): 986-989.
- [3] 郭桂蓉, 等. 电磁特征抽取与目标识别[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1996.
- [4] Bi Z Q, Li J, Liu Z S. Super Resolution SAR Imaging via Parametric Spectral Estimation Methods[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(1): 267-281.
- [5] Wu R B, Li J, Bi Z Q, Stocia P. SAR Image Formation via Semiparametric Spectral Estimation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(4): 1318-1332.
- [6] Liu Z S, Li J. Feature Extraction of SAR Targets Consisting of Trihedral and Dihedral Corn Reflectors[J]. IEE Proc.-Radar, Sonar Navig., 1998, 145(3): 161-172.
- [7] Potter L C, Chiang D M, Carriere R, Gerry M J. A GTD-Based Parametric Model for Radar Scattering[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1995, 43(10): 1058-1067.
- [8] Potter L C, Moses R L. Attributed Scattering Centers for SAR ATR[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(1): 79-91.
- [9] Gerry M J, Potter L C, Gupta I J, et al. A Parametric Model for Synthetic Aperture Radar Measurement[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(7): 1179-1188.
- [10] Koets M A, Moses R L. Feature Extraction Using Attributed Scattering Center Models on SAR Imagery[A]. SPIE 3721: 104-115.
- [11] Akyildiz Y, Moses R L. A Scattering Center Model for SAR Imagery[A]. SPIE 3869: 76-85.
- [12] 孙真真, 等. 一种高频区复杂目标二维散射的参数模型[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(4): 113-119.
- [13] 姜卫东, 等. 光学区雷达目标散射中心提取及识别方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(7): 72-74.
- [14] 王军. 色高斯噪声条件下自动目标识别的雷达目标二维衰减化参数模型方法[J]. 电子学报, 2001, 29(10): 1433-1435.
- [15] 肖劲松. MATLAB 5.x 与科学计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [16] 孙真真. 基于光学区雷达目标二维像的目标散射特征提取的理论及方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2001.