

## 一种大转角 SAR 图像散射中心各向异性提取方法

高悦欣\* 李震宇 盛佳恋 邢孟道

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 基于各向异性特性反映了散射中心本身属性, 该文提出一种大转角 SAR 条件下提取散射中心各向异性特性的算法。首先根据属性散射中心模型分析单个散射中心的回波构成; 之后以单位矩阵作为标准正交基, 将各向异性特性的估计转化为求解散射中心幅度变化的逆问题; 再利用散射中心幅度变化的实数特性与连续性对该逆问题进行约束求解, 实现了对散射中心各向异性特性的提取。Matlab 仿真和电磁计算数据的处理结果验证了算法的准确性以及稳定性; 与现有算法对比, 所提算法运算效率高。

**关键词:** 大转角 SAR; 散射中心; 各向异性

**中图分类号:** TN957.52

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2016)08-1956-06

**DOI:** 10.11999/JEIT151261

## Extraction Method for Anisotropy Characteristic of Scattering Center in Wide-angle SAR Imagery

GAO Yuexin LI Zhenyu SHENG Jialian XING Mengdao

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Based on the fact that anisotropy characteristic represents some intrinsic properties of scattering centers, an algorithm for extracting anisotropy characteristic of scattering centers is proposed when wide-angle SAR is used. Firstly, the components of the echo from a single scattering center are analyzed based on attributed scattering center model. Secondly, the estimation of anisotropy characteristic is transformed into an inverse issue of solving variation of single scattering center's amplitude by using identity matrix as orthonormal basis. Finally, the inverse issue is solved under the constraints that the amplitude of scattering centers should be real and continuous. As a result, anisotropy characteristic is extracted from the solution of the inverse issue. Estimation results of both Matlab simulated and electromagnetic computation data validate that the proposed algorithm is not only precise but also robust. Moreover, the proposed method is more efficient compared with traditional methods.

**Key words:** Wide-angle SAR; Scattering center; Anisotropy

### 1 引言

当雷达工作在光学区时, 目标场景总的电磁散射场可以近似为多个散射中心的电磁散射场的相干叠加。散射中心的幅度与雷达的波长和视角有关, 当视角发生变化时, 散射中心的幅度值也会发生变化, 这种性质被称为散射中心的各向异性特性<sup>[1]</sup>。各向异性主要体现了散射中心的几何特性, 所以提取散射中心的各向异性特性对目标识别和分类能够起到关键作用<sup>[1-3]</sup>。

小转角 SAR 成像中散射中心的各向异性特性

不明显, 该条件下散射中心可以被视为各向同性的散射中心。在大转角 SAR 成像中散射中心的各向异性特性比较明显, 适合提取该特性。现有关于直接提取散射中心各向异性特性的研究较少, 文献[4]提出利用子孔径方法提取散射中心的各向异性, 在孔径不大的条件下散射中心可以近似为各向同性, 但是子孔径长度有限, 回波信息没有完全利用; 文献[5, 6]提出使用 SBR 算法进行单孔径成像获得已知形状的散射体的散射中心的各向异性。文献[7-14]在估计出某种散射中心模型的参数基础上, 间接地得到散射中心的各向异性。但是散射中心模型的各向异性表达式只能描述有限的几种基本模型, 所以其估计结果不能完全反映散射中心的各向异性。文献[3]和文献[15]提出了一种基于方位特性表示的各向异性提取方法, 但是该方法需要构造过冗余字典, 过冗余字典中要包含散射中心所有的各向异性类

收稿日期: 2015-11-09; 改回日期: 2016-04-19; 网络出版: 2016-06-16

\*通信作者: 高悦欣 cngreader@163.com

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(优先发展领域)(20120203130001)

Foundation Item: Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (SRFDP)(20120203130001)

型，导致字典的规模很大，无法直接求解，运算效率低。

为此，本文提出一种改进的各向异性提取方法，不需要构造过冗余字典，采用一个阶数与方位向采样点数相同的单位矩阵作为单个散射中心幅度变化的标准正交基，把对散射中心各向异性提取转化为求线性方程的最小二乘解问题，并对其加上连续性约束和实数约束使得所提算法不但降低了计算量，而且在低信噪比条件下也能准确地估计出散射中心的各向异性特性。仿真实验表明所提算法的有效性与实用性。

## 2 散射中心的回波构成

目前对散射中心描述的模型主要有 3 种：理想点散射模型、衰减指数和模型<sup>[16]</sup>和属性散射中心模型<sup>[14]</sup>，其中属性散射中心同时考虑了物理光学和几何光学理论，相对于其他两种模型更贴近实际情况，本文以属性散射中心模型分析散射中心的回波构成。单个散射中心的属性散射中心模型为

$$E_p(f, \varphi) = A_p \left( j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_p} \operatorname{sinc} \left[ 2\pi \frac{L_p}{C} f \sin(\varphi - \bar{\varphi}_{0p}) \right] \cdot \exp(-2\pi\gamma_p f \sin \varphi) \cdot \exp \left[ -j4\pi \frac{f}{C} (x_p \cos \varphi + y_p \sin \varphi) \right] \quad (1)$$

其中：\$\{A\_p, x\_p, y\_p\}\$ 分别表示散射中心 \$p\$ 的复幅度、横向和纵向位置，本文只考虑散射中心位置坐标固定的情况<sup>[1]</sup>。频率依赖因子 \$\alpha\_p \in [-1.0 \ 0 \ 0.5 \ 1.0]\$ 反映了目标幅度的频率依赖性；\$\{\gamma\_p, L\_p, \bar{\varphi}\_{0p}\}\$ 反映散射中心 \$p\$ 的角度依赖特性。属性散射中心按其角度依赖特性可分为局域式散射中心和展布式散射中心。典型的局域式散射中心包括三面角、帽和球，其 \$L\_p, \bar{\varphi}\_{0p}\$ 均为 0。典型的展布式散射中心包括二面角、平面和圆柱，其 \$\gamma\_p\$ 为 0；\$L\_p\$ 表示散射中心长度，\$\bar{\varphi}\_{0p}\$ 则为初始指向角。

根据式(1)可知，一个散射中心的回波由 4 部分构成，即复幅度 \$A\_p\$、频率依赖项 \$G(f) = (jf/f\_c)^{\alpha\_p}\$，角度依赖项 \$S\_p(f, \varphi) = \operatorname{sinc} \left[ 2\pi \frac{L\_p}{C} f \sin(\varphi - \bar{\varphi}\_{0p}) \right]\$ 或 \$S\_p(f, \varphi) = \exp(-2\pi\gamma\_p f \sin \varphi)\$ 以及位置偏移项 \$\exp \left[ -j4\pi \frac{f}{C} (x\_p \cos \varphi + y\_p \sin \varphi) \right]\$ 构成。考虑到现代雷达工作带宽比(即 \$B/f\_c\$)很小，可以认为 \$G(f) \approx 1\$ 和 \$S\_p(f, \varphi) \approx S\_p(\varphi)\$<sup>[7]</sup>；因此属性散射中心模型可以简化为

$$E_p(f, \varphi) = A_p S_p(\varphi) \exp \left[ -j4\pi \frac{f}{C} (x_p \cos \varphi + y_p \sin \varphi) \right] \quad (2)$$

根据式(2)可以看出散射中心的各向异性主要是由幅度变化项 \$S\_p(\varphi)\$ 引起，所以对散射中心的各向异性特性的提取就是对 \$S\_p(\varphi)\$ 的估计。

## 3 散射中心幅度变化估计方法

设场景中有 \$P\$ 个散射中心，回波数据频率域 \$f\$ 采样点数为 \$K\$，方位观测角 \$\varphi\$ 采样点数为 \$N\$；则回波数据 \$D(f\_k, \varphi\_n)\$ 可表示为

$$D(f_k, \varphi_n) = \sum_{p=1}^P E_p(f_k, \varphi_n) + n(f_k, \varphi_n) = \sum_{p=1}^P A_p \cdot S_p(\varphi_n) \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi f_k}{C} (x_p \cos \varphi_n + y_p \sin \varphi_n) \right] + n(f_k, \varphi_n) \quad (3)$$

其中 \$n(f\_k, \varphi\_n)\$ 为均值为零的加性高斯白噪声。

使用 \$M\$ 个 \$N \times 1\$ 的实数向量集合 \$\mathbf{B} = [\mathbf{b}\_1, \mathbf{b}\_2, \dots, \mathbf{b}\_M]\$ 的线性组合表示 \$\mathbf{S}\_p = [S\_p(\varphi\_1), S\_p(\varphi\_2), \dots, S\_p(\varphi\_N)]^T\$，有

$$\mathbf{S}_p = \sum_{m=1}^M a_{p,m} \mathbf{b}_m \quad (4)$$

根据式(4)将式(3)简化为矩阵形式：

$$\mathbf{D} = \Phi \mathbf{a} + \mathbf{n} \quad (5)$$

式中各参量定义为

$$\mathbf{D} = [\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_K]^T, \quad \mathbf{D}_k = [D(f_k, \varphi_1), D(f_k, \varphi_2), \dots, D(f_k, \varphi_N)]^T$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} A_1 \cdot (\mathbf{B} \odot (\mathbf{r}_{1,1} \mathbf{1}_M^T)) & A_2 \cdot (\mathbf{B} \odot (\mathbf{r}_{2,1} \mathbf{1}_M^T)) & \cdots & A_P \cdot (\mathbf{B} \odot (\mathbf{r}_{P,1} \mathbf{1}_M^T)) \\ A_1 \cdot (\mathbf{B} \odot (\mathbf{r}_{1,2} \mathbf{1}_M^T)) & A_2 \cdot (\mathbf{B} \odot (\mathbf{r}_{2,2} \mathbf{1}_M^T)) & \cdots & A_P \cdot (\mathbf{B} \odot (\mathbf{r}_{P,2} \mathbf{1}_M^T)) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_1 \cdot (\mathbf{B} \odot (\mathbf{r}_{1,K} \mathbf{1}_M^T)) & A_2 \cdot (\mathbf{B} \odot (\mathbf{r}_{2,K} \mathbf{1}_M^T)) & \cdots & A_P \cdot (\mathbf{B} \odot (\mathbf{r}_{P,K} \mathbf{1}_M^T)) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{a} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_P]^T, \quad \mathbf{a}_p = [a_{p,1}, a_{p,2}, \dots, a_{p,M}]^T$$

$$\mathbf{r}_{p,k} = \left[ e^{-j\frac{4\pi f_k}{c}(x_p \cos \varphi_1 + y_p \sin \varphi_1)}, e^{-j\frac{4\pi f_k}{c}(x_p \cos \varphi_2 + y_p \sin \varphi_2)}, \dots, e^{-j\frac{4\pi f_k}{c}(x_p \cos \varphi_N + y_p \sin \varphi_N)} \right]^T$$

$$\mathbf{n} = [\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_K]^T, \quad \mathbf{n}_k = [n(f_k, \varphi_1), n(f_k, \varphi_2), \dots, n(f_k, \varphi_N)]^T$$

其中,  $\odot$  为汉德蒙德乘,  $\mathbf{1}_M$  为  $M$  维的全 1 列向量。

求解式(5)得到  $\mathbf{a}$ , 并根据  $\mathbf{B}$  即可得到各个散射中心的各向异性特性。文献[3]和文献[15]处理该问题时, 需要构造过冗余字典  $\mathbf{B}$ , 并求出符合式(5)的稀疏解。字典  $\mathbf{B}$  中要包含某个散射中心的所有可能幅度变化形式, 若以文献[3]中构建过冗余字典的方法,  $\mathbf{B}$  的规模至少为  $N \times ((N^2 + N)/2)$ 。当方位角采样点数较多时,  $\mathbf{B}$  的规模变得很大, 式(5)无法直接求解, 需要使用基于图形的搜索方法, 这样求解只能找出与字典中某项最接近的一种幅度变化形式, 如果字典中包含的元素没有与散射中心幅度变化接近的, 该方法结果就会变差。

从另一角度考虑该问题, 将幅度变化视为一个线性空间, 则可用一组标准正交基的线性组合表示该空间中的所有幅度变化值。一种比较常用的标准正交基是单位矩阵, 如果以单位矩阵作为基, 相比构造过冗余字典,  $\mathbf{B}$  的规模大大减小。此外不要求  $\mathbf{B}$  中一定包含待估计散射中心的方位幅度变化, 因为各种形式的幅度变化均可使用  $\mathbf{B}$  中向量的线性组合得到, 使得所提方法具有更广的适用性。此时求出的  $\mathbf{a}$  不再具有稀疏性, 所以要求满足式(5)的最小二乘解, 即求满足式(6)的  $\mathbf{a}$  :

$$\hat{\mathbf{a}} = \arg \min_{\mathbf{a}} (\|\mathbf{D} - \Phi \mathbf{a}\|_2^2) \quad (6)$$

直接求解式(6)容易受到噪声的影响。为了提高该方法在低信噪比条件下的表现, 我们需要利用一些先验知识, 包括散射中心幅度变化的实数性和连续性。

### 3.1 $\mathbf{a}$ 的实数性

求解式(6)的主要目的是要估计出散射中心的幅度变化量  $S_p(\varphi)$ , 由第 2 节可知它是一个实数变量。在构造矩阵  $\Phi$  时, 属性散射中心模型中的其他复数量(复幅度和时移项)已经被包含在  $\Phi$  中, 所以求解  $\mathbf{a}$  时, 只需考虑实数解。如果  $\mathbf{D} = \mathbf{D}_R + j\mathbf{D}_I$  和  $\Phi = \Phi_R + j\Phi_I$ ,  $j$  为虚数单位, 式(6)改写为

$$\hat{\mathbf{a}} = \arg \min_{\mathbf{a}} \left( \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{D}_R \\ \mathbf{D}_I \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Phi_R \\ \Phi_I \end{bmatrix} \mathbf{a} \right\|_2^2 \right) \quad (7)$$

相比较直接求解复数解, 改写后的求解可以减少运算量。

### 3.2 散射中心幅度的连续性

一般场景中散射中心的幅度变化是连续的<sup>[1,17,18]</sup>, 即  $\mathbf{a}$  内同一散射中心幅度相邻两数差值较小, 故在求解散射中心幅度时需考虑幅度的连续性; 以  $\mathbf{a}$  中同一点的相邻两数差值之和作为衡量连续性的标准。令  $\mathbf{D}' = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_R \\ \mathbf{D}_I \end{bmatrix}$  和  $\Phi' = \begin{bmatrix} \Phi_R \\ \Phi_I \end{bmatrix}$ , 可得求解的代价函数:

$$J(\mathbf{a}) = \|\mathbf{D}' - \Phi' \mathbf{a}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{D} \mathbf{a}\|_2^2 \quad (8)$$

式(8)中  $\mathbf{D}$  代表离散差分矩阵。对散射中心的各向异性提取问题等价于求解式(9), 即

$$\hat{\mathbf{a}} = \arg \min_{\mathbf{a}} (J(\mathbf{a})) \quad (9)$$

### 3.3 散射中心的选取

求解式(9)之前要先选择一些散射中心作为估计对象, 本文在图像域选取一定数量的散射中心作为估计对象。在选取时应尽量使散射中心布满整个图像的高能量部分, 本文使用 Relax 方法提取图像中的各个强散射中心位置坐标<sup>[7]</sup>, 将各个散射中心按照理想对待, 估计出它们的位置。

### 3.4 散射中心复幅度的估计

在获得各个散射中心的坐标值后, 还需要估计出它们的复幅度值, 本文采用 BP 成像原理<sup>[9]</sup>估计复幅度。根据散射中心的坐标值, 利用 BP 成像原理对散射中心的能量进行积累, 积累之后其幅值可以近似为

$$A_{p\_summ} = K \cdot A_p \sum_{n=1}^N S(\varphi_n) \quad (10)$$

该过程为相干积累过程, 经过该处理, 其他散射中心和噪声对当前点的影响都会大幅降低, 可忽略它们的影响。从式(10)来看, BP 成像结果中散射中心位置处的幅度值为散射中心本身复幅度值的倍数, 所以使用  $A_{p\_summ}/K$  作为散射中心的复幅度值, 这样求出  $n$  时刻的估计值  $S'(\varphi_n)$  为  $S(\varphi_n) / \left( \sum_{n=1}^N S(\varphi_n) \right)$ , 表示对幅度变化值取求和归一化, 故在求解式(9)时, 还可以使用散射中心幅度值和为 1 这一特性进一步约束求解结果。

根据以上叙述, 本文算法可以归结为如图 1 处理流程。

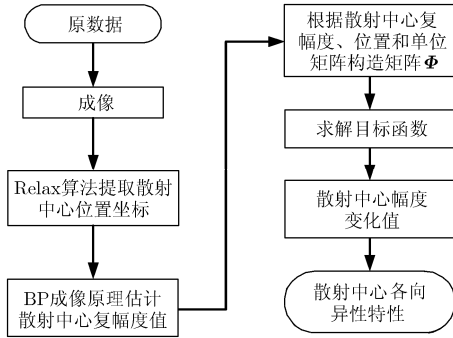


图 1 算法流程图

### 4 实验结果与分析

#### 4.1 Matlab 仿真处理结果和分析

首先考虑较为简单的情况，在场景中布置在 3 个散射中心，复幅度分别为 [1.0,1.5,1.0]，位置分别为 (0,1.0), (0,0) 和 (1.5,0) (单位均为 m)，幅度特性分别为各向同性型、sinc 函数型和 hamming 窗型。雷达发射阶跃扫频信号，距离维步进频信号初始频率为 9.5 GHz，带宽为 1 GHz，采样点数为 32；方位向起始观测角为 -22.5°，终止角为 22.5°，采样点数为 32。对信噪比(SNR)为 10 dB 和 0 dB 的数据进行处理。

在不考虑复幅度与位置估计误差的情况下，分别使用本文方法、文献[3]方法和子孔径方法对场景中散射中心各向异性特性进行估计，图 2 为估计结果，图中虚线为各个散射中心的幅度设定值，实线为估计值，可以看出文献[3]方法所得结果有较为明显的“阶梯状”，比较明显的地方为幅度变化曲线比

较尖锐的地方；子孔径方法所得结果与设定值之间存在差异较明显，尤其是对变化较慢和较快的散射中心的各向异性估计效果不好，本文算法所得结果更贴近设定值。在信噪比较低时，文献[3]方法结果的“阶梯状”更加明显；子孔径方法在两种噪声条件下所得结果相差不大，本文方法所得结果仍贴近设定值，验证了所提方法的稳定性。

为验证所提方法在低信噪比下的稳定性，在不同 SNR 条件下分别进行 50 次蒙特卡罗实验。计算估计幅度与真实幅度之间的相对均方误差(Relative Mean Squared Error, RMSE)<sup>[17]</sup>。RMSE 的定义如式(11)，结果如图 3 所示。

$$RMSE_a = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{\|\hat{a} - a\|_2^2}{\|a\|_2^2} \quad (11)$$

式中， $\hat{a}$  表示幅度的估计值， $a$  为真实值， $L$  为实验次数。

当信噪比大于 10 dB 时，文献[3]方法与本文方法性能比较接近，子孔径方法结果与前两种方法相比估计精度较低。随着信噪比的下降，文献[3]方法的效果恶化程度明显高于本文方法，子孔径方法对噪声影响不敏感，但是其估计性能较低，可见本文方法具有更好的稳定性。

进一步比较运算效率，3 种方法中，子孔径算法的运算效率明显高于其余两种方法，此处不再给出。在主频为 3.4 GHz 的 i7 四核 CPU 内存 8 GB 计算机平台下，用文献[3]方法和本文方法处理相同频率采样点数不同方位向采样点数的数据耗时如表 1 所示。

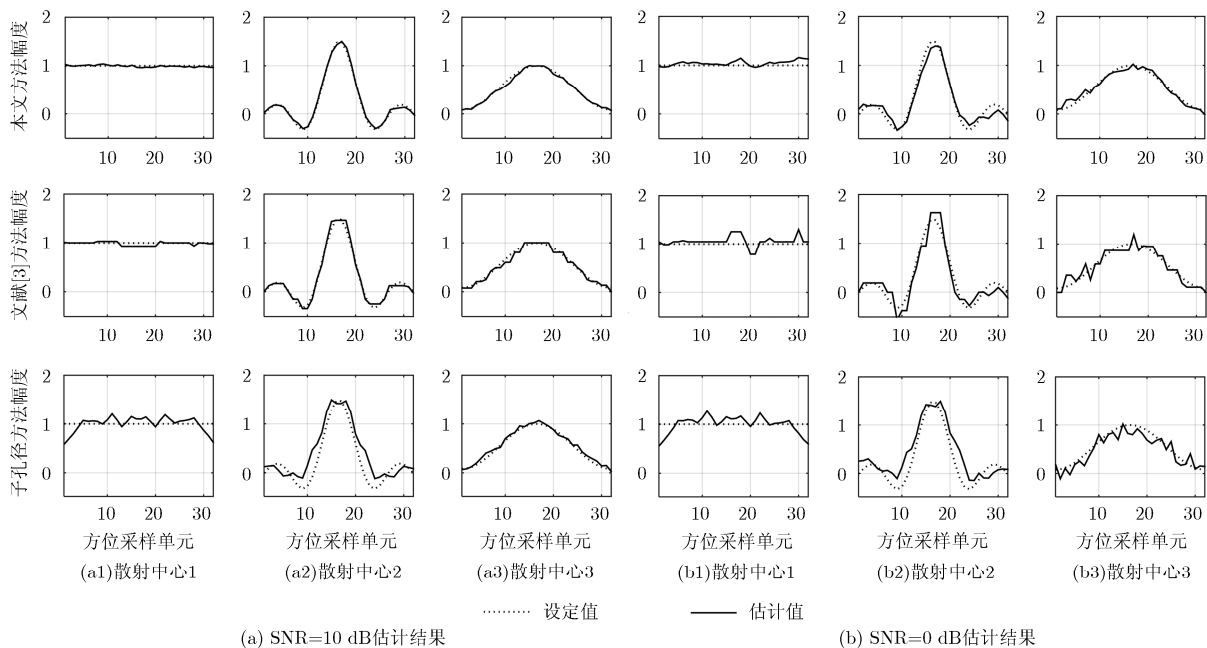


图 2 不同方法幅度估计结果

表1 文献[3]方法与本文方法用时对比(s)

方位向采样点数	32点	48点	64点
文献[3]方法	85.8335	426.8736	1301.9726
本文方法	0.3338	0.4013	0.6915

3种方法中,子孔径方法虽然在运算效率上有着较大的优势,但是它的估计精度相对较低;文献[3]方法在信噪比较高时可以达到较高的估计精度,但是它在信噪比较低时性能下降较快,而且其运算效率较低。相比前两种方法,本文方法的估计精度较高,且相比文献[3]方法,本文方法效率更高,随着方位点数的增加,本文方法在处理效率上的优势更加明显。

### 4.2 电磁计算仿真数据处理与分析

利用电磁计算仿真软件FEKO生成电磁仿真数据,仿真场景如图4所示,包含3个金属球和两根金属棒,图中弧线为观测角变化轨迹。雷达为阶跃扫频模式,频率范围为:8~11 GHz,采样点数96,方位角度 $-22.5^\circ \sim 22.5^\circ$ ,采样点数181。首先对场景进行成像,结果如图5所示,图中左边两个圆圈内为金属棒端点形成的散射中心,与金属球的成像结果相似,若使用基于基本散射模型的参数估计方

法,无法区分出金属球和金属棒端点。使用本文方法提取各向异性特性,其中部分结果如图6所示,被估计点的位置以十字标注于图5中。金属棒2上提取的点的能量基本集中在观测角 $0^\circ$ 左右,变化相对最为剧烈。圆圈内金属棒1虽然成像结果只有两点,但是这两点的幅度变化范围明显比金属球大。由此可以对成像结果中的散射中心进行区分。

为了进一步验证估计的准确性,只在场景中放置金属棒1,使用FEKO软件仿真得到目标回波,并从回波脉压后的1维距离像提取它的两个端点的幅度变化的仿真值归一化后与估计值进行比较,结果如图7,可以看出估计结果与电磁仿真结果趋势一致。验证了本文方法提取的幅度变化的准确性。

### 5 结论

本文提出了一种大转角SAR成像条件下散射中心各向异性特性的提取方法。该方法能够有效地估计出散射中心的幅度变化,为目标的分类和参数估计提供了有力支撑。相比已有幅度变化估计方法,本文通过使用标准正交基替代过冗余字典和利用散射中心幅度变化连续和实数性对求解进行约束,降低了问题求解的规模,并且提高了方法的稳定性。

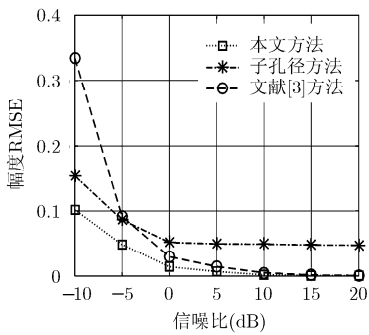


图3 不同方法的RMSE随噪声变化情况

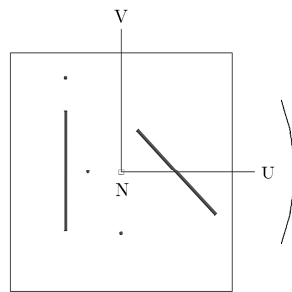


图4 FEKO仿真场景

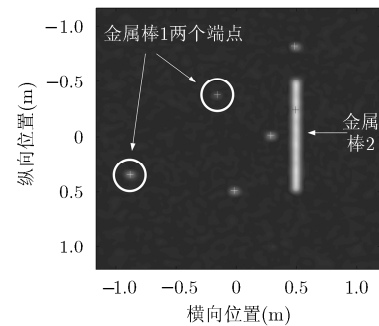


图5 BP成像结果

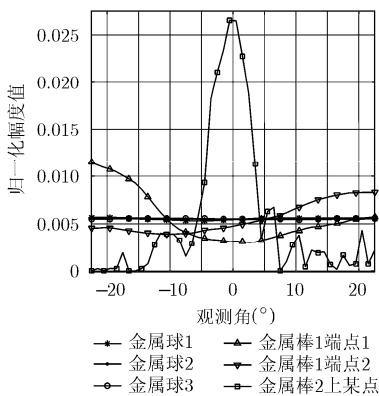


图6 幅度变化提取结果

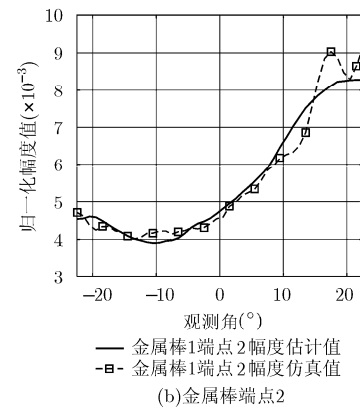
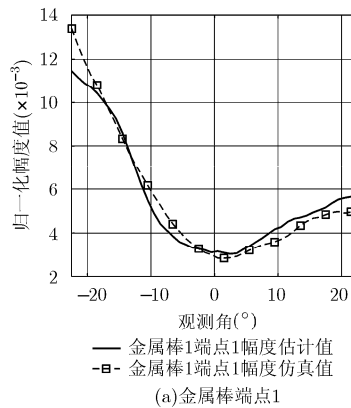


图7 金属棒1端点幅度变化量估计值与仿真值对比

## 参考文献

- [1] ASH J N, ERTINE, POTTER L C, *et al.* Wide-angle synthetic aperture radar imaging: models and algorithms for anisotropic scattering[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(4): 16–26. doi: 10.1109/MSP.2014.2311828.
- [2] MÜJDAT Ç, IVANA S, ÖNHON N Ö, *et al.* Sparsity-driven synthetic aperture radar imaging: Reconstruction, autofocusing, moving targets, and compressed sensing[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(4): 27–40. doi: 10.1109/MSP.2014.2312834.
- [3] KUSH R V, MÜJDAT C, JOHN W F, *et al.* Sparse representation in structured dictionaries with application to synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(8): 3548–3561. doi: 10.1109/TSP.2008.919392.
- [4] KIM A, FISHER J, and WILLSKY A. Detection and analysis of anisotropic scattering in SAR data[J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2003, 14(1): 49–82. doi: 10.1023/A:1022268908156.
- [5] 姬伟杰, 童创明. 二维海面上舰船目标电磁散射及合成孔径雷达成像技术研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(16): 11–18. doi: 10.7498/aps.61.160301.
- JI Weijie and TONG Chuangming. Research on electromagnetic scattering computation and synthetic aperture radar imaging of ship located on two-dimensional ocean surface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(16): 11–18. doi: 10.7498/aps.61.160301.
- [6] 周剑雄. 光学区雷达目标三维散射中心重构理论与技术[D]. [博士论文], 国防科学技术大学, 2006. doi: 10.7666/d.y1101904.
- ZHOU Jianxiong. The theory and technology on reconstruction of 3D scattering center from optical region radar[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2006. doi: 10.7666/d.y1101904.
- [7] 段佳, 张磊, 邢孟道, 等. 合成孔径雷达目标特征提取新方法[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(4): 13–19. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2014.04.003.
- DUAN Jia, ZHANG Lei, XING Mengdao, *et al.* Novel feature extraction method for synthetic aperture radar targets[J]. *Journal of Xidian University (Natural Science)*, 2014, 41(4): 13–19. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2014.04.003.
- [8] 段佳, 张磊, 盛佳恋, 等. 独立属性散射中心参数降耦合估计方法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(8): 1853–1859. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.01302.
- DUAN Jia, ZHANG Lei, SHENG Jialian, *et al.* Parameters decouple and estimation of independent attributed scattering centers[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(8): 1853–1859. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.01302.
- [9] 吴敏, 张磊, 段佳, 等. 基于属性散射中心模型的 SAR 超分辨率成像算法[J]. *宇航学报*, 2014, 35(9): 1058–1064. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2014.09.011.
- WU Min, ZHANG Lei, DUAN Jia, *et al.* Super-resolution SAR imaging algorithm based on attribute scattering center model[J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35(9): 1058–1064. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2014.09.011.
- [10] 李飞, 纠博, 刘宏伟, 等. 基于稀疏表示的 SAR 图像属性散射中心参数估计算法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(4): 931–937. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00576.
- LI Fei, JIU Bo, LIU Hongwei, *et al.* Sparse representation based algorithm for estimation of attributed scattering center parameter on SAR imagery[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(4): 931–937. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00576.
- [11] DUAN Jia, ZHANG Lei, and XING Mengdao. Polarimetric target decomposition based on attributed scattering center model for synthetic aperture radar targets[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(12): 2095–2099. doi: 10.1109/LGRS.2014.2320053.
- [12] 李飞, 纠博, 王英华, 等. 一种 SAR 目标属性特征提取算法[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(3): 15–21. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2015.03.003.
- LI Fei, JIU Bo, WANG Yinghua, *et al.* Novel method for attributed feature extraction from SAR imagery[J]. *Journal of Xidian University (Natural Science)*, 2015, 42(3): 15–21. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2015.03.003.
- [13] DANE F F and MICHAEL A S. A high-frequency multipole model for wide-angle SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(7): 4279–4291. doi: 10.1109/TGRS.2012.2226732.
- [14] POTTER L C and MOSES R L. Attributed scattering centers for SAR ATR[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 5(1): 79–91. doi: 10.1109/83.552098.
- [15] 陶勇, 胡卫东. 基于方位特性表征的属性散射中心模型参数估计方法[J]. *信号处理*, 2010, 26(5): 736–740. doi: 10.3969/j.issn.1003-0530.2010.05.017.
- TAO Yong and HU Weidong. An aspect-dependence characteristics-based approach for parameter estimation of attribute scattering center model[J]. *Signal Processing*, 2010, 26(5): 736–740. doi: 10.3969/j.issn.1003-0530.2010.05.017.
- [16] Gerry M J, Potter L C, Gupta J I, *et al.* A parametric model for synthetic aperture radar measurements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1999, 47(7): 1179–1188. doi: 10.1109/8.785750.
- [17] IVANA S, MÜJDAT C, and WILLIAM C K. Joint space aspect reconstruction of wide-angle SAR exploiting sparsity [C]. *Proceedings of the SPIE Defense and Security Symposium*, Orlando, FL, USA, 2008: 697005. doi: 10.1117/12.786288.
- [18] 林达, 徐新, 潘雪峰, 等. 一种新的 MSTAR SAR 图像分割方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2014, 39(11): 1314–1317. doi: 10.13203/j.whugis20130262.
- LIN Da, XU Xin, PAN Xuefeng, *et al.* Segmentation of SAR image of MSTAR SAR chips based on attributed scattering center feature and markov random field[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(11): 1314–1317. doi: 10.13203/j.whugis20130262.
- [19] LARS M H U, HANS H, and GUNNAR S. Synthetic aperture radar processing using fast factorized back-projection[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(3): 760–776. doi: 10.1109/TAES.2003.1238734.
- 高悦欣: 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为逆合成孔径雷达成像。
- 李震宇: 男, 1991 年生, 博士生, 研究方向为大斜视 SAR 成像。
- 盛佳恋: 女, 1987 年生, 博士生, 研究方向为稀疏 ISAR 超分辨率。
- 邢孟道: 男, 1975 年生, 教授, 博士, 主要研究方向为 SAR/ISAR 成像、动目标检测等。