

## 基于稀疏表示的 SAR 图像属性散射中心参数估计算法

李飞 纠博\* 刘宏伟 王英华 张磊

(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:** 考虑目标频率-方位 2 维观测数据在属性散射中心模型参数空间上的稀疏性, 该文提出一种基于稀疏表示的属性散射中心提取与参数估计方法。由于模型参数维数较高, 构造的高维联合字典将消耗较多系统资源。该算法通过分别构建包含位置信息与方位属性参数信息的两个低维字典代替高维的联合字典实现距离特性与方位特性的解耦合, 以降低资源需求, 并通过正交匹配追踪(OMP)-RELAX 联合算法求解  $l_0$  优化问题, 从而实现在频率-方位角域上位置参数与方位属性参数的联合估计。根据提取的属性散射中心可以有效地估计目标或目标重要部件的几何尺寸。基于电磁计算数据和实测数据的实验结果验证了该算法的有效性。

**关键词:** SAR; 属性散射中心; 稀疏表示; 正交匹配追踪(OMP); RELAX

**中图分类号:** TN957.52

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2014)04-0931-07

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2013.00576

## Sparse Representation Based Algorithm for Estimation of Attributed Scattering Center Parameter on SAR imagery

Li Fei Jiu Bo Liu Hong-wei Wang Ying-hua Zhang Lei

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

**Abstract:** Considering the sparsity of the frequency-aspect backscattered data in the attributed scattering center model parameter domain, a novel method based on sparse representation is proposed to extract attributed scattering center and estimate parameters in frequency-aspect domain. Due to the high dimension of model parameter, one high dimensional joint dictionary needs to be constructed, which may cost a mass storage. In this paper, two low dimensional dictionaries including localization and aspect attribute parameters respectively are constructed to replace the high dimensional joint dictionary to decouple the range characteristic and aspect characteristic, and reduce resource cost; Orthogonal Matching Pursuit (OMP) combined with RELAX are utilized to find the solution of the minimum  $l_0$  norm optimization issue and estimate localization parameters and aspect attribute parameters simultaneously. With the extracted attributed scattering centers, geometrical dimensions of the target or its main structure can be estimated. Numerical results both on electromagnetic computation data and measured data verify the validity of the proposed method.

**Key words:** SAR; Attributed scattering center; Sparse representation; Orthogonal Matching Pursuit (OMP); RELAX

### 1 引言

雷达成像技术是 20 世纪 50 年代发展起来的, 雷达成像系统可以全天候、全天时获取目标的高分辨率图像, 极大地增强了雷达获取信息的能力, 在军事和民事上具有广泛的实用价值。传统雷达成像以点散射模型为基础<sup>[1,2]</sup>, 该模型只包含目标散射点强

度与位置信息, 但仅利用目标散射点的位置信息构建的识别特征并不能完备表征雷达图像中目标的本质属性。在光学区, 扩展目标的高频电磁散射响应可以用一组独立分布的散射体, 或称散射中心的电磁散射响应之和近似表示<sup>[3-13]</sup>。目标的散射中心主要产生于目标的边缘、拐点、棱角及尖端等不连续点部位, 代表了目标的精细物理结构, 所以散射中心模型能够更贴切地描述目标属性, 也在雷达目标识别领域有着重要的应用<sup>[12,13]</sup>。

基于几何绕射理论和物理光学理论, Gerry 等人<sup>[6]</sup>提出了一个适用于合成孔径雷达的参数化模型——属性散射中心模型。属性散射中心模型用一组参数描述每个散射中心的位置、形状、方向以及

2013-04-25 收到, 2013-12-02 改回

国家自然科学基金(61271291, 61271024, 61201292, 61201283), 新世纪优秀人才支持计划(NCET-09-0630), 全国优秀博士学位论文作者专项资金(FANEDD-201156)和中央高校基本科研业务费专项资金资助课题

\*通信作者: 纠博 bojiu@mail.xidian.edu.cn

幅度等,这些属性参数提供了关于目标的重要信息;同点散射模型相比,属性散射中心模型包含了更丰富的可用于目标分类识别的特征<sup>[12,13]</sup>。

属性散射中心提取本质上是一个从目标回波数据中估计各个散射中心参数的过程,即电磁逆散射问题<sup>[6-12]</sup>。由于属性散射中心模型结构复杂以及参数维数较高,模型参数估计的复杂度大大增加。文献[6]通过对目标雷达图像进行图像分割,得到阶数较低的目标散射区或者是孤立的散射中心,利用近似最大似然方法估计目标的属性散射中心参数,然而这将面临参数初始化、模型阶数选择等问题。文献[7,8]对上述方法进行改进,提出了参数初始化、模型阶数选择方法。但是由于属性散射中心在图像域的表现形式的复杂性,目标内在散射特性并不能由传统的图像分割算法来描述,而且图像分割算法会将一些倾斜角(即分布式散射中心与方位向的夹角)非零的分布式散射中心分割为几个局部式散射中心;此外图像分割得到的各个邻近孤立散射区之间存在能量泄露问题。因此基于图像分割的属性散射中心属性参数估计性能对分割结果很敏感。

雷达回波中,目标散射场绝大部分能量仅由少量强散射中心贡献,说明雷达回波在属性散射中心的参数空间上具有很强的稀疏性。考虑属性散射中心参数空间维数较高,导致联合构造包含散射中心位置 $(x,y)$ 信息与方位属性参数 $(L,\bar{\phi})$ 的冗余字典维数将会远远大于可处理的维数。本文通过分别构造包含 $(x,y)$ 与 $(L,\bar{\phi})$ 的两个参数化字典代替高维联合字典计算字典与信号相关系数,从而实现距离特性与方位特性的解耦合以降低资源需求;为了减小邻近属性散射中心之间的相互影响,将RELAX算法<sup>[14]</sup>思想引入正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)算法中,利用OMP-RELAX联合算法近似求解 $l_0$ 优化问题完成参数 $(x,y,L,\bar{\phi})$ 的联合估计;最后分别对频率依赖因子 $\alpha$ 与方位依赖因子 $\gamma$ 估计,实现属性散射中心提取与参数估计。本文所提算法通过对频率-方位角域观测信号进行稀疏分析,提取属性散射中心,有效避免了图像分割带来的问题。

## 2 属性散射中心模型

根据几何绕射理论和物理光学理论,在光学区雷达目标后向散射场可近似为局部散射场的叠加。考虑后向散射场对频率和方位角的依赖关系,属性散射中心模型具体表达式为

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

其中 $f$ 为雷达频率, $\phi$ 为方位角, $M$ 为散射中心个数, $\theta^T = [\theta_1^T, \theta_2^T, \dots, \theta_i^T, \dots, \theta_M^T]$ 表示 $M$ 个散射中心的参数矩阵, $\theta_i$ 表示第 $i$ 个散射中心的参数向量:

$[A_i, x_i, y_i, L_i, \bar{\phi}_i, \alpha_i, \gamma_i], (\cdot)^T$ 表示转置。第 $i$ 个散射中心后向散射场 $E_i(f,\phi;\theta_i)$ 可表示为<sup>[4-9]</sup>

$$E_i(f,\phi;\theta_i) = A_i \left( j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_i} \exp \left( \frac{-j4\pi f}{c} (x_i \cos \phi + y_i \sin \phi) \right) \cdot \text{sinc} \left( \frac{2\pi f}{c} L_i \sin(\phi - \bar{\phi}_i) \right) \exp(-2\pi f \gamma_i \sin \phi) \quad (2)$$

其中 $f_c$ 为雷达中心频率, $c = 3 \times 10^8$  m/s。参数 $x_i$ 和 $y_i$ 分别表示散射中心距离向与方位向的坐标, $A_i$ 为散射中心复幅度, $\alpha_i$ 描述散射强度的频率依赖性,一般 $\alpha_i \in \{-1.0, -0.5, 0, 0.5, 1.0\}$ 。方位属性参数 $(L_i, \bar{\phi}_i, \gamma_i)$ 则表征散射中心对方位角的依赖关系。对于局部式散射中心 $L_i = 0, \bar{\phi}_i = 0, \gamma_i$ 为方位依赖因子;对于分布式散射中心 $L_i$ 为散射中心长度, $\bar{\phi}_i$ 为其倾斜角, $\gamma_i = 0$ 。参数 $\alpha_i$ 与 $L_i$ 可以用来区分简单几何散射体,如表1所示<sup>[4-9]</sup>。

表1 不同几何散射体对应的 $(\alpha, L)$

几何散射类型	$\alpha$	$L$
二面角	1.0	$L > 0$
三面角	1.0	$L = 0$
圆柱	0.5	$L > 0$
球	0	$L = 0$
边缘侧向	0	$L > 0$
边缘绕射	-0.5	$L > 0$
角绕射	-1.0	$L = 0$

## 3 基于稀疏信号分析的属性散射中心提取算法

### 3.1 稀疏信号分析理论

考虑到雷达回波在属性散射中心参数空间上的稀疏性,雷达回波的稀疏信号表示可以用于分析和提取目标的属性散射中心。属性散射中心模型的矩阵形式可以表示为

$$s = D(\theta)\sigma + n \quad (3)$$

式中 $s$ 表示观测 $E(f,\phi)$ 的列向量化, $D(\theta)$ 为对应参数集合 $\theta$ 的字典, $\sigma$ 为稀疏系数向量, $n$ 表示加性高斯白噪声。通过求解式(4)的 $l_0$ 优化问题可以得到属性散射中心参数估计与雷达回波的稀疏表示。

$$\hat{\sigma} = \arg \min_{\sigma} \|\sigma\|_0, \text{ s.t. } \|s - D(\theta) \cdot \sigma\|_2 < \varepsilon \quad (4)$$

其中 $\|\cdot\|_p$ 表示 $l_p$ 范数, $\hat{\sigma}$ 为估计的稀疏系数向量, $\varepsilon$

为噪声水平。 $l_0$ 优化问题可以通过贪婪算法近似求解,如匹配追踪(Matching Pursuit, MP)<sup>[15]</sup>,正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)<sup>[16]</sup>等。这里我们采用 OMP 算法近似求解  $l_0$  优化问题。

### 3.2 属性散射中心提取算法

由于模型参数空间维数很高,随着参数估计精度的提高,参数化字典  $\mathbf{D}(\boldsymbol{\theta})$  原子数急剧增加。在此先分析参数  $\alpha, \gamma$  对观测数据的影响,然后对属性散射中心模型进行简化,基于简化模型构建包含位置信息的字典  $\mathbf{D}(x, y)$  和包含方位属性参数  $(L, \bar{\phi})$  的字典  $\mathbf{D}(L, \bar{\phi})$ , 代替高维的联合字典  $\mathbf{D}(x, y, L, \bar{\phi})$  实现距离特性与方位特性的解耦合与字典降维,最后给出属性散射中心提取算法的具体步骤。

从式(2)可以看出:

(1)式(2)中包含参数  $\alpha$  项  $\left(j \frac{f}{f_c}\right)^\alpha$  不仅影响观测

强度而且影响其相位。

(2)参数  $\gamma$  为局部式散射中心的方位依赖因子,仅仅影响观测强度。

一般情况下,雷达相对带宽  $B/f_c$  ( $B$  为雷达信号带宽)、方位角域都很小,所以  $\left(j \frac{f}{f_c}\right)^\alpha$  项和  $\exp(-2\pi f \gamma_i \sin \phi)$  项近似为常数,因此估计参数  $(x, y, L, \bar{\phi})$  时属性散射中心模型可以简化为

$$\hat{E}_i(f, \phi; \theta_i) = A_i \cdot \exp\left(\frac{-j4\pi f}{c}(x_i \cos \phi + y_i \sin \phi)\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{2\pi f}{c} L_i \sin(\phi - \bar{\phi}_i)\right) \quad (5)$$

根据式(5)构造字典并估计参数  $(x, y, L, \bar{\phi})$ , 最后分别估计参数  $\alpha, \gamma$ 。

为了估计参数  $(x, y, L, \bar{\phi})$ , 需要构造包含  $(x, y, L, \bar{\phi})$  信息的高维参数化字典  $\mathbf{D}(x, y, L, \bar{\phi})$ , 其维数为  $N_x \times N_y \times N_L \times N_{\bar{\phi}}$ , 其中  $N_x, N_y, N_L, N_{\bar{\phi}}$  分别为参数集合中  $(x, y, L, \bar{\phi})$  各个参数的量化个数。可见维数巨大的字典  $\mathbf{D}(x, y, L, \bar{\phi})$  消耗较多的系统资源,增加了计算复杂度。由式(5)可以看出属性散射中心距离特性体现在指数项,而方位特性则体现为 sinc 函数幅度项。距离特性与方位特性的不同体现形式为其解耦合提供了基础。考虑到本文采用 OMP 算法近似求解  $l_0$  优化问题,而 OMP 算法依据信号与字典之间的相关性实现基的选择,因此可以通过分别构造两个包含位置信息的字典  $\mathbf{D}(x, y)$  和包含方位属性参数  $(L, \bar{\phi})$  的字典  $\mathbf{D}(L, \bar{\phi})$  代替高维的联合字典  $\mathbf{D}(x, y, L, \bar{\phi})$  计算信号与字典相关系数,实现距离特性与方位特性的解耦合。 $\mathbf{D}(x, y), \mathbf{D}(L, \bar{\phi})$  可分别表

示为

$$\mathbf{D}(x, y) = [\hat{\mathbf{d}}_{1,1}, \hat{\mathbf{d}}_{1,2}, \dots, \hat{\mathbf{d}}_{1,N_y}, \dots, \hat{\mathbf{d}}_{N_x,1}, \dots, \hat{\mathbf{d}}_{N_x,N_y}] \quad (6)$$

$$\mathbf{D}(L, \bar{\phi}) = [\bar{\mathbf{d}}_{1,1}, \bar{\mathbf{d}}_{1,2}, \dots, \bar{\mathbf{d}}_{1,N_{\bar{\phi}}}, \dots, \bar{\mathbf{d}}_{N_L,1}, \dots, \bar{\mathbf{d}}_{N_L,N_{\bar{\phi}}}] \quad (7)$$

其中  $\hat{\mathbf{d}}_{i,j} = \mathbf{d}_{i,j} / \|\mathbf{d}_{i,j}\|_2$ ,  $\bar{\mathbf{d}}_{i,j} = \mathbf{d}'_{i,j} / \|\mathbf{d}'_{i,j}\|_2$ 。

$$\mathbf{d}_{i,j} = \text{vec}\left(\exp\left(\frac{-j4\pi f}{c}(x_i \cos \phi + y_j \sin \phi)\right)\right) \quad (8)$$

$$\mathbf{d}'_{i,j} = \text{vec}\left(\text{sinc}\left(\frac{2\pi f}{c} L_i \sin(\phi - \bar{\phi}_j)\right)\right) \quad (9)$$

其中  $\text{vec}(\cdot)$  表示列向量化操作。通过式(10)与式(11)可以计算信号与字典  $\mathbf{D}(x, y), \mathbf{D}(L, \bar{\phi})$  的相关系数矩阵  $\mathbf{C}(x, y, L, \bar{\phi})$ 。

$$\hat{\mathbf{R}}^T(L, \bar{\phi}) = \mathbf{D}^T(L, \bar{\phi}) \text{diag}(\mathbf{r}) \quad (10)$$

$$\mathbf{C}(x, y, L, \bar{\phi}) = \mathbf{D}(x, y)^H \cdot \hat{\mathbf{R}}(L, \bar{\phi}) \quad (11)$$

其中  $\mathbf{r}$  为 OMP 算法中的信号余量向量,  $\text{diag}(\cdot)$  表示对角化操作,  $(\cdot)^H$  表示矩阵共轭转置。式(10)本质是信号  $\mathbf{r}$  在字典  $\mathbf{D}(L, \bar{\phi})$  每个原子方向进行投影,也可理解为通过实字典  $\mathbf{D}(L, \bar{\phi})$  的每个原子对信号  $\mathbf{r}$  进行加权;然后由式(11)即可得到最终的相关系数矩阵  $\mathbf{C}(x, y, L, \bar{\phi})$ , 而  $\mathbf{C}(x, y, L, \bar{\phi})$  的第  $i$  行第  $j$  列元素  $c_{ij}$  对应的参数为字典  $\mathbf{D}(x, y)$  的第  $i$  列与字典  $\mathbf{D}(L, \bar{\phi})$  第  $j$  列的参数  $(x, y, L, \bar{\phi})$ 。

属性散射中心提取的 OMP-RELAX 算法步骤如下:

步骤 1 构造参数化字典  $\mathbf{D}(x, y), \mathbf{D}(L, \bar{\phi})$ 。通过目标支撑区确定位置参数  $x, y$  的范围,  $L, \bar{\phi}$  的取值范围则可由先验信息确定,由式(6)与式(7)构造参数化字典  $\mathbf{D}(x, y), \mathbf{D}(L, \bar{\phi})$ 。计算字典  $\mathbf{D}(x, y)$  与观测信号的归一化相关系数,并设定相关系数门限,可以对字典  $\mathbf{D}(x, y)$  进行降维。

步骤 2 估计  $(x, y, L, \bar{\phi})$ 。由于 OMP 算法依据信号与字典之间的相关性实现基的选择,邻近散射中心的相互干扰会影响 OMP 的算法性能。因此本文将 RELAX 算法<sup>[14]</sup>引入 OMP 算法中来减小这种干扰。该算法以重构能量比的相对变化量作为 OMP 与 RELAX 的联合算法迭代终止条件,当重构能量比的相对变化量大于设定的相应门限  $\eta$  则继续,否则终止迭代。通过 OMP-RELAX 联合算法求解式(12)的  $l_0$  优化问题,由稀疏系数向量  $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$  得到所提取属性散射中心参数  $(x, y, L, \bar{\phi})$  估值集合  $\boldsymbol{\theta}$ 。

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \arg \min_{\boldsymbol{\sigma}} \|\boldsymbol{\sigma}\|_0, \text{ s.t. } \|\mathbf{s} - \mathbf{D}(x, y, L, \bar{\phi}) \cdot \boldsymbol{\sigma}\|_2 < \varepsilon \quad (12)$$

在 OMP 第  $k$  次迭代过程中,首先根据式(10)与式(11)计算相关系数矩阵,然后利用 RELAX 算法对每一信号分量参数进行修正,求解如式(13)的优化问题。

$$\hat{\theta}_j = \arg \min_{\sigma_j, \theta'_j} \left\| \mathbf{s} - \sum_{i=1, i \neq j}^k \sigma_i \mathbf{d}_i(\theta_i) - \sigma_j \mathbf{D}(x, y, L, \bar{\phi} | \theta'_j) \right\|_2^2, \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (13)$$

其中  $\theta_i$  为第  $i$  分量参数,  $\mathbf{d}_i(\theta_i)$  为第  $i$  分量对应的原子,  $\sigma_i$  为其复系数,  $\theta'_j$  为参数  $\theta_j$  附近的细化网格参数集,  $\mathbf{D}(x, y, L, \bar{\phi} | \theta'_j)$  为对应参数集合  $\theta'_j$  的字典,  $\hat{\theta}_j$  为第  $j$  分量参数的修正值。根据修正后的参数对参数估计集合与信号余量进行更新, 进行下一步迭代直至满足终止条件。

**步骤3 估计  $\alpha$ 。** 首先根据散射中心长度  $L$  判断散射中心类型:  $L > 0$  为分布式散射中心,  $\alpha \in \{-0.5, 0, 0.5, 1.0\}$ ;  $L = 0$  为局部式散射中心,  $\alpha \in \{-1.0, 0, 1\}$ 。然后将参数  $(x, y, L, \bar{\phi})$  估值集合  $\theta$  扩展, 包含频率依赖因子  $\alpha$ , 扩展后的参数集合为  $\hat{\theta}_\alpha$ 。根据  $\hat{\theta}_\alpha$  构造字典  $\mathbf{D}(\alpha | \hat{\theta}_\alpha)$  如式(14)。

$$\mathbf{D}(\alpha | \hat{\theta}_\alpha) = [\mathbf{d}_{\alpha 1}, \mathbf{d}_{\alpha 2}, \dots, \mathbf{d}_{\alpha i}, \dots, \mathbf{d}_{\alpha M}] \quad (14)$$

其中  $\mathbf{d}_{\alpha i} = \bar{\mathbf{d}}_{\alpha i} / \|\bar{\mathbf{d}}_{\alpha i}\|_2$ ,  $M$  为原子个数。  $\bar{\mathbf{d}}_{\alpha i}$  可表示为

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{d}}_{\alpha i} = \text{vec} \left( \left( j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_i} \exp \left( \frac{-j4\pi f}{c} (x_i \cos \phi + y_i \sin \phi) \right) \right. \\ \left. \cdot \text{sinc} \left( \frac{2\pi f}{c} L_i \sin(\phi - \bar{\phi}_i) \right) \right), \\ (\alpha_i, x_i, y_i, L_i, \bar{\phi}_i) \in \theta_\alpha \end{aligned} \quad (15)$$

求解式(16)可得参数  $\alpha$  估计, 由稀疏系数向量  $\hat{\sigma}_\alpha$  更新参数估计集合为  $\theta_\alpha$ 。

$$\hat{\sigma}_\alpha = \arg \min_{\sigma} \|\sigma\|_0, \quad \text{s.t.} \quad \left\| \mathbf{s} - \mathbf{D}(\alpha | \hat{\theta}_\alpha) \cdot \sigma \right\|_2 < \varepsilon \quad (16)$$

**步骤4 估计  $\gamma$ 。** 针对局部式散射中心根据方位依赖因子  $\gamma$  取值范围构造字典  $\mathbf{D}(\gamma | \hat{\theta}_\gamma)$  如式(17),  $\theta_\gamma$  为集合  $\theta$  中局部式散射中心扩展包含  $\gamma$  信息后的参数集合。

$$\mathbf{D}(\gamma | \hat{\theta}_\gamma) = [\mathbf{d}_{\gamma 1}, \mathbf{d}_{\gamma 2}, \dots, \mathbf{d}_{\gamma i}, \dots, \mathbf{d}_{\gamma M'}] \quad (17)$$

其中  $M'$  为原子个数,  $\mathbf{d}_{\gamma i}$  可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_{\gamma i}(f, \phi) = \left( j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_i} \exp \left( \frac{-j4\pi f}{c} (x_i \cos \phi + y_i \sin \phi) \right) \\ \cdot \text{sinc} \left( \frac{2\pi f}{c} L_i \sin(\phi - \bar{\phi}_i) \right) \exp(2\pi f \gamma_i \sin \phi) \end{aligned} \quad (18)$$

求解如式(19)的  $l_0$  优化问题可得最终属性散射中心参数集合  $\theta_\gamma$  与观测信号  $\mathbf{s}$  的稀疏表示。需要注意的是, 利用 OMP 算法求解式(19)的  $l_0$  优化问题时, 因为式(18)中包含方位依赖因子项为  $\exp(2\pi f \gamma_i \sin \phi)$ , 所以以相关最小为基选准则。

$$\hat{\sigma} = \arg \min_{\sigma} \|\sigma\|_0, \quad \text{s.t.} \quad \left\| \mathbf{s} - \mathbf{D}(\gamma | \hat{\theta}_\gamma) \cdot \sigma \right\|_2 < \varepsilon \quad (19)$$

## 4 性能分析与实验验证

### 4.1 估计性能分析

为了分析本文方法的参数估计性能, 在不同信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)情况下进行蒙特卡洛实验, 并对参数估计方差与克拉美罗界(Cramér-Rao Bound, CRB)<sup>[10]</sup>进行了比较。

假设雷达中心频率  $f_c = 9.599$  GHz, 信号带宽  $B = 591$  MHz, 方位角域  $\phi \in [-2.2^\circ, 2.2^\circ]$ 。所有蒙特卡洛实验中散射中心参数相同, 散射中心参数随机产生, 坐标参数为  $x = 19.0677$  m,  $y = 5.1816$  m, 频率依赖因子  $\alpha = 0$ ; 对于局部式散射中心  $\gamma = 2.1 \times 10^{-10}$ , 分布式散射中心  $L = 1.0277$  m,  $\bar{\phi} = 0.0122$  rad。信噪比变化范围为:  $[-20, 20]$  dB, 100次蒙特卡洛实验参数估计方差以及相应的 CRB 如图1, 图2所示。

由图1与图2可知不同信噪比条件下, 对于局部式散射中心和分布式散射中心两种情况下参数估计性能与 CRB 很接近。需要特别注意, 由于参数化字典的离散参数网格作用, 所得估计会存在一定偏差, 本文通过在步骤2中对参数网格的细化使参数估计结果渐近无偏。此外由于频率依赖因子  $\alpha$  离散取值, 其估计方差并不能作为其估计性能的评判准则, 图3给出了  $\alpha$  正确检测概率随信噪比的变化曲线, 其中  $P_{dL}(\alpha)$ ,  $P_{dD}(\alpha)$  分别表示局部式散射中心与分布式散射中心情况下  $\alpha$  的正确检测概率。由图3可以看出当 SNR < 12 dB 时, 局部式散射中心情况下的检测概率要高于分布式散射中心情况下的检测概率, 这是由于分布式散射中心模型比局部式散射中心模型复杂, 而且参数  $(L, \bar{\phi})$  估计误差也会影响  $\alpha$  的估计。

### 4.2 实验验证

该小节通过对电磁计算数据以及 MSTAR 实测数据的实验来验证本文方法的有效性。

**4.2.1 电磁计算数据实验结果** 电磁计算目标模型如图4所示, 目标为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  线框, 半径为  $3 \times 10^{-5}$  m, 线框为理想导体; 其散射场通过矩量法计算得到。线框位于  $ZOY$  平面内, 线框中心与坐标原点  $O$  重合。  $\psi, \varphi$  分别为雷达视线  $OR$  的俯仰角与方位角。雷达中心频率  $f_c = 9.599$  GHz, 信号带宽  $B = 2$  GHz, 频率步进量 20 MHz, 频率点数为 101, 方位角步进量为  $0.1^\circ$ 。实验中信噪比为 0 dB。

当雷达视线变化范围为  $\psi \in [-3.2^\circ, 3.2^\circ]$ ,  $\varphi = 25.6^\circ$ , 目标原始图像与重构图像分别如图5与图6所示。由本文算法提取的属性散射中心参数如表2所示。由图5与图6可以清楚地看出目标线框表现为两个分布式散射中心, 而这两个分布式散射

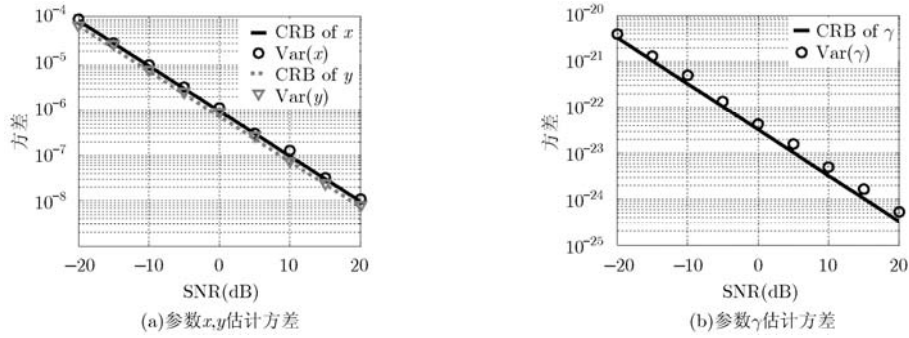


图 1 不同信噪比下局部式散射中心参数估计方差与 CRB

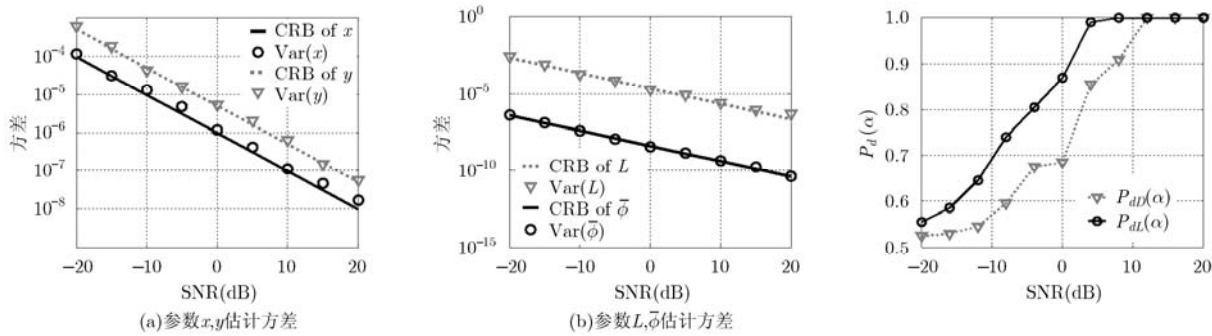


图 2 不同信噪比下分布式散射中心参数估计方差与 CRB

图 3 不同信噪比下频率依赖因子  $\alpha$  的检测概率

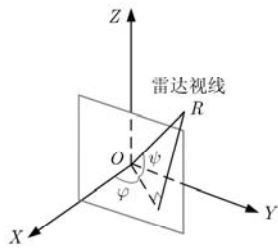


图 4 电磁计算目标模型

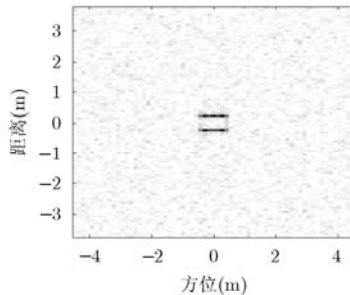


图 5 目标原始图像

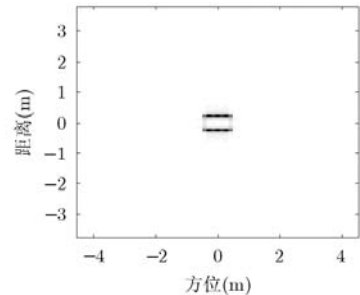


图 6 目标重构图像

表 2  $\psi \in [-3.2^\circ, 3.2^\circ], \varphi = 25.6^\circ$  属性散射中心参数

	$A$	$x(m)$	$y(m)$	$\alpha$	$\gamma$	$L(m)$	$\bar{\phi}(^\circ)$
散射中心 1	$4.15+0.02j$	-0.2156	0	0	0	0.91	0
散射中心 2	$3+2.64j$	0.2156	0	0	0	0.91	0

中心对应图 4 中线框的左右两侧边框。根据表 2 中属性参数可知两个属性散射中心长度均为 0.91 m，倾斜角为  $0^\circ$ ；由两个散射中心距离向的距离差与雷达视视角可得两个散射中心的真实间隔距离为  $(x_2 - x_1) / \sin(25.6^\circ) = 0.998 \text{ m}$ 。

当雷达视线变化范围为  $\psi \in [0.6^\circ, 13.4^\circ], \varphi=0^\circ$ ，目标原始图像与重构图像分别如图 7 与图 8 所示。由于目标处于远场且  $\varphi = 0^\circ$ ，目标线框两个侧边的

散射中心处于同一距离单元，侧边的散射中心在雷达图像中类似于两个局部式散射中心，而线框侧边实际应表现为分布式散射中心，这是因为中心雷达视线与线框两侧边夹角为  $7^\circ$ ，该属性散射中心的参数如表 3 所示，其长度为 1.01 m。基于图像分割的属性散射中心提取算法则更倾向于将该分布式散射中心作为两个局部式散射中心处理。

以上两种情况下线框估计长度均接近真实长度 1 m，而且频率依赖因子  $\alpha = 0$  即散射中心的几何散射类型为边缘绕射，所以表 2，表 3 所提取属性散射中心均能正确反映目标的真实结构。

表 3  $\psi \in [0.6^\circ, 13.4^\circ], \varphi = 0^\circ$  属性散射中心参数

	$A$	$x(m)$	$y(m)$	$\alpha$	$\gamma$	$L(m)$	$\bar{\phi}(^\circ)$
散射中心	$-1+0.61j$	0	0	0	0	1.01	-7

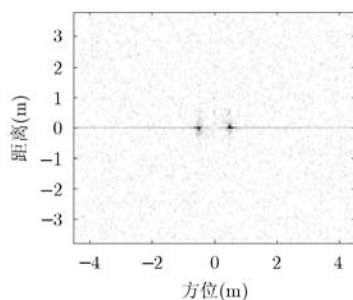


图 7 目标原始图像

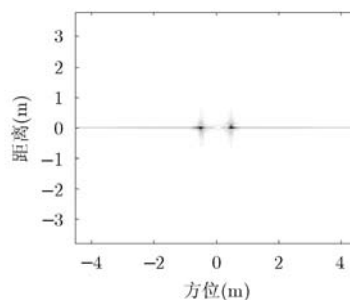


图 8 目标重构图像

**4.2.2 MSTAR 实测数据实验结果** 本文采用 MSTAR 数据库中 T72 坦克 SAR 数据, 数据录取角度: 俯仰角为  $15^\circ$ , 方位角变化范围为  $[78.57^\circ, 82.97^\circ]$ 。车体长 6.41 m, 炮向前时炮筒伸出长度 3.035 m, 炮筒长 6.155 m, 车宽 3.52 m。T72 原始 SAR 图像如图 9 所示。

由本文算法提取 T72 坦克的属性散射中心, 并得到其重构图像如图 10 所示。比较图 9 与图 10 可知, 本文算法能够有效抑制噪声。算法性能也可以通过残差图像<sup>[7]</sup>来评估, 残差图像如图 11 所示, 其中以原图像中强度最大值为归一化基准。目标支撑区内残差图像强度约为  $-25$  dB, 重构能量比  $\delta = 86.1\%$ ; 文献[7]中基于图像分割的属性散射中心提取算法的残差图像在  $-10$  dB 左右, 重构能量比为  $\delta = 85\%$ 。由于文献[7]中只给出重构能量比的结果并未提供提取散射中心的参数, 在此仅仅同其重构能量比进行比较。

由估计的属性参数可以得到目标及其重要部件的重要尺寸信息, 如图 10 所示。表 4 给出炮筒散射中心参数, 其中散射中心 1 为炮筒伸出部分, 估计长度为 2.742 m, 散射中心 2 为炮筒与坦克体位置重叠部分, 炮筒总长为 6.04 m。文献[8]中提取的炮筒为一长度 1.37 m 的分布式散射中心。表 5 中给出用于估计 T72 坦克体长度的散射中心参数, 估计长度为 6.15 m。表 5 中散射中心 1 对应坦克体上边缘, 散射中心 2 对应坦克体尾部的部件。由炮筒至坦克

表 4 T72 炮筒散射中心参数

	$A$	$x(\text{m})$	$y(\text{m})$	$\alpha$	$\gamma$	$L(\text{m})$	$\bar{\phi}(\text{°})$
散射中心 1	$194+121j$	12.309	6.398	1	0	2.742	0
散射中心 2	$37-57j$	12.690	9.546	1	0	3.046	-2.75

表 5 T72 坦克体的属性散射中心

	$A$	$x(\text{m})$	$y(\text{m})$	$\alpha$	$\gamma$	$L(\text{m})$	$\bar{\phi}(\text{°})$
散射中心 1	$96-77j$	13.832	8.023	1	0	1.1679	-0.94437
散射中心 2	$-22-69j$	11.928	13.152	1	0	0.9140	-1.49750

体下边缘的径向距离可知坦克体宽为 3.57 m, 目标支撑区可知 T72 坦克总长为 9.1 m。

由电磁计算数据以及 MSTAR 实测数据的实验结果可以看出, 本文算法不仅能够精确恢复观测信号, 而且能够提取目标的重要属性散射中心用于估计目标及其重要部件的几何尺寸, 如 T72 炮筒长度。

## 5 结束语

属性散射中心模型用一组参数描述每个散射中心的位置、形状、方向以及幅度等, 这些属性参数都是反映目标特性的重要信息。考虑到目标散射场绝大部分能量仅由少量强散射中心贡献, 本文依据雷达回波的稀疏性提出一种基于稀疏信号分析的属

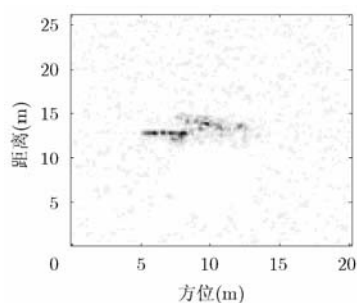


图 9 T72 坦克原始 SAR 图像

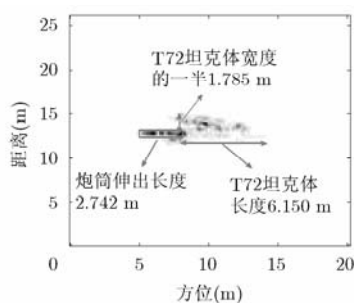


图 10 T72 坦克重构图像

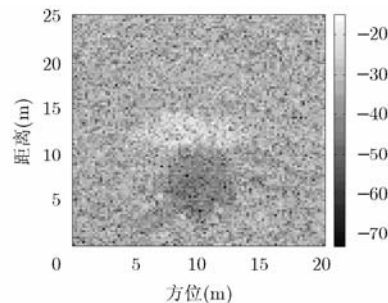


图 11 T72 坦克残差图像

性散射中心提取算法, 并通过构造两个分别包含位置信息  $\mathbf{D}(x, y)$  与方位属性参数信息的字典  $\mathbf{D}(L, \bar{\phi})$  代替高维的联合字典  $\mathbf{D}(x, y, L, \bar{\phi})$ , 实现距离特性与方位特性的解耦合, 降低了系统资源要求, 并通过 OMP-RELAX 联合算法求解  $l_0$  优化问题完成参数  $(x, y, L, \bar{\phi})$  的联合估计。根据估计属性参数可以估计目标及其重要部件的几何尺寸。基于电磁计算数据与 MSTAR 实测数据的实验结果验证了本文算法的有效性。如何利用提取的属性散射中心进行目标分类识别将是下一步需要深入研究的工作。

### 参考文献

- [1] 邓云凯, 赵凤军, 王宇. 星载 SAR 技术的发展趋势及应用浅析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 1-10.  
Deng Yun-kai, Zhao Feng-jun, and Wang Yu. Brief analysis on the development and application of spaceborne SAR[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 1-10.
  - [2] 李飞, 纠博, 刘宏伟. 基于随机霍夫变换的干涉 ISAR 横向定标算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 49-55.  
Li Fei, Jiu Bo, and Liu Hong-wei. A novel method of cross-range scaling interferometric ISAR based on randomized hough transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(1): 49-55.
  - [3] 邵长宇, 杜兰, 李飞, 等. 基于多目标跟踪的空间锥体目标微多普勒频率提取方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(12): 2972-2977.  
Shao Chang-yu, Du Lan, Li Fei, et al. Micro-Doppler extraction from space cone target based on multiple target tracking[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(12): 2972-2977.
  - [4] Potter L C, Chiang D M, Carrière R, et al. A GTD-based parametric model for radar scattering[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 1995, 43(10): 1058-1067.
  - [5] Potter L C and Moses R L. Attributed scattering centers for SAR ATR[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(1): 79-91.
  - [6] Gerry M J, Potter L C, Gupta I J, et al. A parametric model for synthetic aperture radar measurements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1999, 47(7): 1179-1188.
  - [7] Koets A and Moses L. Feature extraction using attributed scattering center models on SAR imagery[C]. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery VI, SPIE 3721, Orlando, FL, 1999: 104-115.
  - [8] Koets A and Moses L. Image domain feature extraction from synthetic aperture imagery[C]. Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Phoenix, AZ, 1999: 2319-2322.
  - [9] 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.  
Tao Yong and Hu Wei-dong. An aspect-dependence characteristics-based approach for parameter estimation of attribute scattering center model[J]. *Signal Processing*, 2010, 26(5): 736-740.
  - [10] 段佳, 张磊, 盛佳恋, 等. 独立属性散射中心参数解耦合估计方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(8): 1853-1859.  
Duan Jia, Zhang Lei, Sheng Jia-lian, et al. Parameters decouple and estimation of independent attributed scattering centers[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(8): 1853-1859.
  - [11] Xu Shao-kun, Wei Xi-zhang, Li Xiang, et al. Parameter estimation and performance analysis of coherent polarization attributed scattering center model[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2013, 22(1): 195-201.
  - [12] 付强, 周剑雄, 秦敬喜, 等. 雷达目标散射中心模型反演及其在识别中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(1): 48-52.  
Fu Qiang, Zhou Jian-xiong, Qin Jing-xi, et al. Global scattering center model extraction and its application in radar target recognition[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(1): 48-52.
  - [13] Dungan K E and Potter L C. Classifying sets of attributed scattering centers using a hash coded database[C]. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVII, SPIE 7699, Orlando, FL, 2010: 213-224.
  - [14] Li Jian and Stoica P. Efficient mixed-spectrum estimation with applications to target feature extraction[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(2): 281-295.
  - [15] Mallat S G and Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3397-3415.
  - [16] Tropp J A. Greed is good: algorithmic results for sparse approximation[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(10): 2231-2242.
- 李飞: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为雷达成像和目标特征提取。  
 纠博: 男, 1982年生, 博士, 副教授, 研究方向为自适应信号处理、雷达自动目标识别。  
 刘宏伟: 男, 1971年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达系统、雷达信号处理、雷达自动目标识别等。  
 王英华: 女, 1982年生, 博士, 副教授, 研究方向为 SAR 图像目标检测与识别。  
 张磊: 男, 1984年生, 博士, 讲师, 研究方向为雷达成像与运动补偿。