

## 独立属性散射中心参数降耦合估计方法

段佳\* 张磊 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:** 属性散射中心模型是基于几何绕射(GTD)模型完善得到,其模型参数具有频率和方位依赖特性,相比点散射模型对目标特征描述更为准确。但属性散射中心模型中也引入了参数维数增加的问题,模型参数估计相对困难。针对属性散射中心模型的参数估计,该文对图像分割后获得的独立散射中心进行研究,提出一种将部分参数降耦合的参数估计算法。通过建立合理的代价函数进行参数估计。相对传统参数估计方法,该方法无需获取准确的参数的初始值,从而在复杂性和时效性上有很大的改进。最后,基于仿真数据的实验论证了该文方法的有效性。

**关键词:** 雷达图像处理; 参数估计; 属性散射中心; 参数降耦合

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)08-1853-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01302

## Parameters Decouple and Estimation of Independent Attributed Scattering Centers

Duan Jia Zhang Lei Sheng Jia-lian Xing Meng-dao

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Modified and developed from the original Geometrical Theory of Diffraction (GTD) model, attributed scattering center model takes the advantages of both frequency and angle dependent properties for the model parameters, providing much richer information of the target. However, it also brings such problem as parameter dimension increasing. Research on the independent scattering centers a novel algorithm of parameter estimation is proposed, where the linking parameter dimension could be reduced effectively and the parameters could be estimated in precision. In the scheme, the object function is constructed to seek parameters and they can be estimated by solving the optimization. In this method, precision initial values of the parameters are not required. Thus the computational complexity is reduced. Numeric simulation results confirm the validation of the proposed algorithm.

**Key words:** Radar image processing; Parameter estimation; Attributed scattering centers; Weaken parameters linking

### 1 引言

当雷达工作在高频区(物体尺寸远远大于波长)时,目标的总电磁散射可以近似等效为多个局部散射源的电磁散射之和<sup>[1]</sup>,这些局部散射源又被称为散射中心。散射中心的提取技术是研究目标特征提取的重要技术,它对于目标的分类与识别有着重要意义<sup>[2]</sup>。近年来,人们对散射模型进行了一系列研究,针对传统的点散射模型分辨率受限等问题,先后提出了指数衰减模型、几何绕射模型(GTD)和属性散射中心模型。其中,属性散射中心模型<sup>[3]</sup>,对目标的散射中心的描述较之另外两种模型更为贴切且参数物理意义明确而引起研究者的重视。属性散射中心

模型的参数估计问题就是从回波数据中提取出散射中心并对其参数进行估计。它从几何绕射解和物理光学的角度出发,为散射中心提供了更完备的电磁特性和几何特性信息。但是,由于其参数维数的增加并且参数之间相互耦合,使得其研究也存在很大的难度。

常用的基于图像域的最大似然估计(MLE)算法<sup>[4]</sup>主要分为4步:图像分割、模型类别选择、参数初始值选择和参数优化。由于其代价函数非凸,使得其对参数初始值的精度要求较高,否则容易陷入局部最大。

本文通过构造无噪声条件下的代价函数,使散射中心的部分参数之间解耦合,接着在高斯白噪声条件下对代价函数进行修改。在分割效果较好时,该方法可以直接用于散射中心的参数估计;否则,也可作为参数初始值再进一步进行优化。文章结构

2011-12-09 收到, 2012-04-13 改回

国家自然科学基金(61001211)资助课题

\*通信作者: 段佳 bifiduan119@126.com

如下：首先，给出了2维属性散射中心模型，对其简化模型进行分析；接着，分析无噪声和高斯白噪声下的参数提取方法，并给出相应参数提取流程；最后通过仿真实验结果，验证了本文方法的有效性。

## 2 2维属性散射中心参数化模型

在高频(光学)区，雷达目标的电磁散射响应可等效为若干散射中心的电磁散射的相干叠加<sup>[1]</sup>，

$$S(f, \varphi) = \sum_{p=1}^P S_p(f, \varphi) \quad (1)$$

其中，方位角  $\varphi = \varphi_0 + n \times \Delta\varphi$ ， $n = 0, 1, \dots, N-1$ ； $\varphi_0$  为雷达视角；步进调频信号频率  $f = f_0 + m \times \Delta f$ ， $m = 0, 1, \dots, M-1$ ， $f_0$  为频率起始值。 $S(f, \varphi)$  表示无噪声下总散射回波， $P$  表示散射中心的个数， $S_p(f, \varphi)$  表示散射中心  $p$  的回波数据，用属性散射中心模型<sup>[3]</sup>对其进行描述，有

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

其中  $c$  表示光速；在图像域有两种散射中心：局部式和展布式散射中心。它们共有的参数： $A_p, x_p, y_p$  分别表示散射中心  $p$  的幅度、横向和纵向位置；而  $\alpha_p \in [-1, -0.5, 0, 0.5, 1]$  为其频率依赖因子。 $\gamma_p, L_p, \bar{\varphi}_{0p}$  表示散射中心的角度依赖特性。典型的局部式散射中心包括三面角、点、帽和球，其  $L_p = \bar{\varphi}_{0p} = 0$ 。典型的展布式散射中心包括二面角、平面和圆柱，其  $\gamma_p = 0$ ； $L_p$  表示散射中心的长度， $\bar{\varphi}_{0p}$  表示该散射中心的初始指向角。参数  $\alpha_p$  和  $L_p$  的不同组合可以用于区分简单典型散射中心类型，组合形式详见表1。因此， $\alpha_p$  对于目标识别相当重要；幅度  $A_p$  在不同极化下其值不同；对于局部式散射中心，其  $\gamma_p$  非常小，其估计对识别没有意义，往往忽略；参数  $L_p, \bar{\varphi}_{0p}$  是目标的几何信息，可用于 SAR 图像可视化。

显然，为了准确得到参数  $\alpha_p$ ，要求雷达工作带宽相对于中心频率值不能太小。否则，频率调制项

表1 不同散射机理的频率依赖因子

$\alpha_p$	$L_p$	散射中心类型
1	>0	二面角
1	=0	三面角
0.5	>0	圆柱
0	=0	球
-0.5	>0	边缘绕射
-1	=0	角绕射

$\left( j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_p} \approx 1$ ，此时有  $\text{sinc} \left[ 2\pi \frac{L_p}{c} f \sin(\varphi - \bar{\varphi}_{0p}) \right] \approx \text{sinc} \left[ 2\pi \frac{L_p}{\lambda} \sin(\varphi - \bar{\varphi}_{0p}) \right]$ ，幅度调制退化为仅随方位

空变的函数： $A_p \cdot \text{sinc} \left[ 2\pi \frac{L_p}{\lambda} \sin(\varphi - \bar{\varphi}_{0p}) \right]$ ；若为局部式散射中心  $L_p = \bar{\varphi}_{0p} = 0$ ，模型退化为点散射中心模型；而展布式散射中心的幅度调制则是沿方位变化的，因而可利用此性质判断散射中心类型。此时若是小角度观测， $\text{sinc} \left[ 2\pi \frac{L_p}{\lambda} \sin(\varphi - \bar{\varphi}_{0p}) \right]$  全落在主瓣内，这样展布式散射中心也退化为我们熟知的点散射模型。

## 3 属性散射中心参数估计方法

使用最大似然估计<sup>[4]</sup>优化代价函数：

$$\hat{\theta} = \text{argmin} [d - e(\theta)]^H \Sigma^+ [d - e(\theta)] \quad (3)$$

其中  $\theta$  表示参数集向量； $d$  表示 SAR 图像列向量； $e(\theta)$  则是利用估计参数反演回波成像后的列向量； $\Sigma^+$  为 SAR 噪声的协方差矩阵的逆。可以看出，优化代价函数非凸，因此对于初始参数的精度要求高，否则容易陷入局部极值。而现有的初始参数的估计方法达到的精度是相当有限的。因此，有必要提出一种精度更高的参数初始化方法。

### 3.1 无噪声条件下，优化代价函数的构造

属性散射中心模型参数维数大且参数间相互耦合，若采用最大似然同时搜索参数，从运算量和复杂性上都不理想。因而，考虑能否将多维参数估计问题分解成几个顺序执行的低维参数估计的问题。

令  $L'_p = L_p \sin(\varphi - \bar{\varphi}_{0p})$ ， $r_p = (x_p \cos \varphi + y_p \sin \varphi)$ ，式(2)可写成如下形式：

$$S_p(f, \varphi) = A_p \left( j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_p} \text{sinc} \left[ 2\pi \frac{L'_p}{c} f \right] \exp \left[ -j4\pi \frac{f}{c} r_p \right] \quad (4)$$

将式(4)分别对各参数求梯度，有

$$\frac{dS_p}{d\alpha_p} = \ln \left| j \frac{f}{f_c} \right| \times S_p, \quad \frac{dS_p}{dL'_p} = \left( L'_p \cot \left( \frac{2\pi f}{c} L'_p \right) - 1 \right) \times S_p, \quad \frac{dS_p}{dr_p} = \left( -j \frac{4\pi f}{c} \right) \times S_p \quad (5)$$

现设 SAR 的带宽与中心频率比不会大于 1.5，有  $\ln \left| j \frac{f}{f_c} \right| < 1$ ；而散射中心长度一般只有几米，所以  $\left( L'_p \cot \left( \frac{2\pi f}{c} L'_p \right) - 1 \right) < L'_p - 1$ ；而现有属性散射模型参数估计<sup>[4]</sup>对 SAR 有高分辨要求，载频一般为 GHz 量级， $(4\pi f / C) > 4\pi$ 。可以看出，各参数误差相同

情况下, 位置误差对散射回波影响最大。图 1 以一个幅度归一化, 位于(1,0)处,  $\alpha=0.5$  的局部散射中心为例, 其横向、纵向分辨率均为 0.15 m。图 1(a) 和图 1(b) 分别给出了当横向位置与真实值偏差 0.15 m 纵向位置与真实值偏差 0.2 m 时, 最大似然优化代价函数随频率依赖因子变化情况。可以看出, 当横向与纵向位置估计出现大于一个像素的误差时, 会影响频率依赖因子的准确估计。因此, 首先估计影响较小的参数, 最后再估计位置参数。而图 1(c) 和图 1(d) 则为本文改进的代价函数随频率依赖因子的变化, 改进代价函数的构造将在下面章节进行详细说明。

(1) 位置参数与其他参数的解耦合 回波的相位只反映散射中心的位置信息, 其他参数则对回波幅度进行调制, 在信噪比较高时可以利用这一性质进行位置与其他参数的解耦合。

为了去除幅度的影响, 对散射中心回波进行归一化, 有

$$\begin{aligned} S_p(f, \varphi) &= \frac{1}{C} A_p \left( j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_p} \operatorname{sinc} \left[ 2\pi \frac{L_p}{c} f \sin(\varphi - \bar{\varphi}_{0p}) \right] \\ &\quad \times \exp \left[ -j4\pi \frac{f}{c} (x_p \cos \varphi + y_p \sin \varphi) \right] \\ &= \left( j \frac{f}{f_{\max}} \right)^{\alpha_p} \cdot \operatorname{sinc} \left[ 2\pi \frac{L_p}{c} f \sin(\varphi - \bar{\varphi}_{0p}) \right] \\ &\quad \times \exp \left[ -j4\pi \frac{f}{c} (x_p \cos \varphi + y_p \sin \varphi) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $C = \max \{ |S_p(f, \varphi)| \} = A_p \left( \frac{f_{\max}}{f_c} \right)^{\alpha_p}$ ; 由估计参数集  $\{ \hat{x}, \hat{y}, \hat{\alpha}, \hat{L}, \hat{\varphi}_0 \}$  构造相同结构函数:

$$\begin{aligned} \hat{S}_p(f, \varphi) &= \left( j \frac{f}{f_{\max}} \right)^{\hat{\alpha}_p} \cdot \operatorname{sinc} \left[ 2\pi \frac{\hat{L}_p}{c} f \sin(\varphi - \hat{\varphi}_{0p}) \right] \\ &\quad \times \exp \left[ -j4\pi \frac{f}{c} (\hat{x}_p \cos \varphi + \hat{y}_p \sin \varphi) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

为了能将  $\{ \alpha, \hat{L}, \hat{\varphi}_0 \}$  与位置参数  $\{ x, y \}$  解耦合, 构造函数:

$$P_1(f, \varphi) = \left| \frac{S_p}{\hat{S}_p} \right| = \left| \frac{\left( j \frac{f}{f_{\max}} \right)^{\alpha_p} \cdot \operatorname{sinc} \left( 2\pi L_p \frac{f}{c} \sin(\varphi - \bar{\varphi}_{0p}) \right)}{\left( j \frac{f}{f_{\max}} \right)^{\hat{\alpha}_p} \cdot \operatorname{sinc} \left( 2\pi \hat{L}_p \frac{f}{c} \sin(\varphi - \hat{\varphi}_{0p}) \right)} \right| \quad (8)$$

其中  $| \cdot |$  表示取幅度; 由式(8)可以看出, 此时  $P_1(f, \varphi)$  与散射中心的位置及幅度均无关。这样我们首先可将参数集分为 3 组: 即  $\{ x, y \}$ ,  $\{ A \}$  和  $\{ \alpha, L, \bar{\varphi}_0 \}$ , 3 组参数的估计相互独立。此时, 对图 1 的散射中心重新进行考察, 当横向位置偏差 0.15 m, 纵向位置偏差 0.2 m 时, 式(8)随频率依赖因子的变化如图 1(c), 1(d) 所示。可以看出: 此时位置误差对于频率依赖因子估计的影响大大降低, 且只要频率依赖因子为真实值, 则目标函数为 0, 因而此时的目标函数与位置估计的精确性无关。如此便实现了位置参数与其他参数的解耦合。

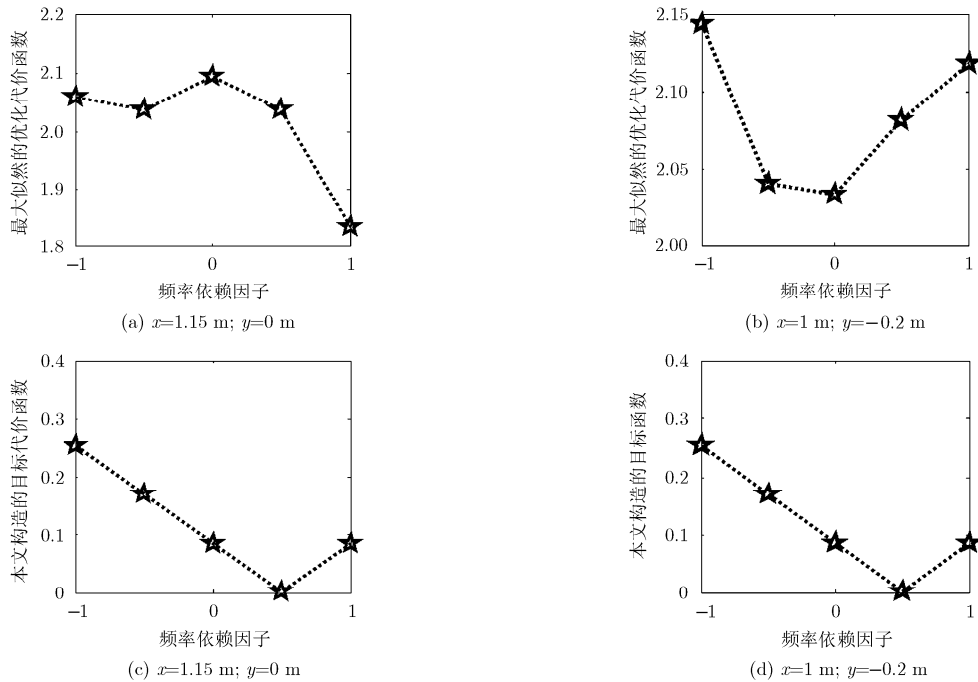


图 1 位置误差对频率依赖因子影响

(2)参数 $\{\alpha, L, \bar{\varphi}_0\}$ 估计 为了能将 $\{L, \bar{\varphi}_0\}$ 与 $\alpha$ 的估计相对独立, 对式(8)取对数, 则有

$$P_2(f, \varphi) = \ln P_1(f, \varphi) = \ln \left| \frac{S_p}{\hat{S}_p} \right| = \Delta\alpha_p \cdot \ln \left| \frac{f}{f_{\max}} \right| + \ln \left| \frac{\text{sinc} \left( 2\pi L_p \frac{f}{c} \sin(\varphi - \bar{\varphi}_{0p}) \right)}{\text{sinc} \left( 2\pi \hat{L}_p \frac{f}{c} \sin(\varphi - \hat{\varphi}_{0p}) \right)} \right| \quad (9)$$

其中 $\Delta\alpha = \alpha - \hat{\alpha}$ ; 取

$$P_3(\theta) = \sum_f \sum_\varphi |P_2(f, \varphi)| \quad (10)$$

其中 $\theta = \{\hat{A}, \hat{\alpha}, \hat{L}, \bar{\varphi}_0\}$ 表示估计的参数集。

由式(9)可知, 取 $f_{\max}$ 附近小段频率对应回波值, 使得 $\ln|f/f_{\max}| \approx 0$ ; 这样, 目标函数越小, 长度、角度和真实值之间的误差也越小。在长度和角度估计准确时, 式(9)中第2项为0; 此时, 目标函数越小则频率依赖因子越接近真实值。实际中, 对于展布式散射中心, 采用双迭代搜索频率依赖因子长度和角度至一定精度, 即先估计长度和初始指向角再搜索频率依赖因子, 利用估计的 $\alpha$ 重新搜索 $\{L, \bar{\varphi}_0\}$ 。对于局域式散射中心, 则只需估计频率依赖因子即可。

### 3.2 高斯白噪声条件下参数估计

(1)参数 $\{\alpha, L, \bar{\varphi}_0\}$ 估计 假设在高斯白噪声背景下录取数据(以单个散射中心为例), 接收回波可写成

$$\mathbf{d}_p(k) = \mathbf{S}_p(k) + \mathbf{e}_p(k) \quad (11)$$

其中 $\mathbf{d}_p(k)$ 表示实际接收的散射中心 $p$ 的回波列向量,  $\mathbf{S}_p(k)$ 表示散射中心 $p$ 的回波列向量,  $\mathbf{e}_p(k)$ 为加性复高斯白噪声;  $k=1, 2, \dots, K; K=M \times N$ 。此时, 已知 $\mathbf{d}_p(k)$ 及由参数反演的回波列向量 $\hat{\mathbf{S}}_p(k)$ , 若能用两个向量构造出具有参数解耦合的函数形式 $\ln|\mathbf{S}/\hat{\mathbf{S}}|$ , 便可回到无噪声下的估计, 取

$$\mathbf{d}_p \mathbf{d}_p^H = \mathbf{S}_p \mathbf{S}_p^H + \sigma^2 \mathbf{I}_N \quad (12)$$

由于高斯白噪声的自相关矩阵为对角矩阵; 此时, 可以认为除去对角线上元素,  $\mathbf{d}_p \mathbf{d}_p^H$ 与 $\mathbf{S}_p \mathbf{S}_p^H$ 相同, 因此求和时除去对角线元素, 将上述矩阵与 $\hat{\mathbf{S}}_p \hat{\mathbf{S}}_p^H$ 构成的矩阵对应元素相除构造与式(9)近似等价的下式, 即

$$S_4 = \sum_{m \neq n} \sum_n \left| \ln \left| \frac{\mathbf{d}(m) \mathbf{d}(n)}{\hat{\mathbf{S}}(m) \hat{\mathbf{S}}(n)} \right| \right| \quad (13)$$

(2)参数 $\{x, y\}$ 估计 局域式和展布式散射中心对于位置参数的估计方法相同。

假设上述参数估计准确的情况下, 将其代入式(7), 利用最大似然准则求解位置参数:

$$\hat{\theta} = \{x, y\} = \arg \min_f \sum_\varphi |S_p(f, \varphi) - \hat{S}_p(f, \varphi)| \quad (14)$$

对于式(14), 由于参数维数较低(2维), 可采用多种优化算法进行求解, 直接进行搜索即可。

(3)用最小二乘估计幅度<sup>[4]</sup>与初始化方法相同, 这里就不再给出。

整个参数估计的顺序:  $(L, \bar{\varphi}_0) \rightarrow \alpha \rightarrow (x, y) \rightarrow A$ ; 由于最大似然估计对于位置 $(x, y)$ 敏感, 位置估计的准确性会影响其他参数的估计; 因而对估计顺序进行修改, 先通过构造形如式(13)的目标函数, 估计影响较小的参数, 然后再估计位置参数; 最后估计复幅度 $A$ 则会受到其他参数估计精度的影响。但是, 在不考虑极化提取目标特征时, 它相较于其它参数也就不那么重要了。这样, 便将高维参数估计这样一个复杂问题退化成几个简单的低维参数估计问题, 从而节省了运算量。且低维参数估计参考了最大似然估计, 估计精度要优于一般初始化。因而, 该方法可用作初始化进一步精估计, 或直接作为快速估计。

## 4 多个散射中心参数估计方法

对多个相对独立的目标散射中心参数估计, 利用图像分割、散射中心结构判别方法<sup>[4-9]</sup>得到图像域的独立散射中心, 逆变换回到对应频率域数据, 然后根据本文提出的独立散射中心解耦和参数估计方法进行估计, 具体步骤如下:

步骤1 利用原始傅里叶算法粗成像, 大转角时采用复数 I-radon/BP 变换。

步骤2 对于粗成像结果在图像域进行分割, 采用改进的图像域 SAR 目标散射中心特征提取方法或分水岭算法, 忽略散射中心之间的耦合, 对于散射中心按能量高低一次提取, 取得 SAR 图像的总能量的 75%(根据具体要求另行设置)的  $N$  个独立散射中心。

步骤3 对提取出的每个独立散射中心进行类型判断。

步骤4 利用本文提出的降耦合参数估计算法进行搜索。

(1)粗估计: 通过 2 维逆傅里叶变换(小角度)或 Radon<sup>[10]</sup>变换(大转角)从图像域粗估计位置和长度。

(2)精估计:

(a)将回波幅度归一化;

(b)利用粗估计的长度搜索使代价函数最小的  $L, \bar{\varphi}_0$ ;

(c)在 5 个  $\alpha$  参数中搜索使得  $P_3$  最小的值作为  $\alpha$

的估计值；

(d)由已估计的 $\{\alpha\}$ 和 $\{L, \varphi_0\}$ 反演回波幅度响应，最大似然估计 $\{x, y\}$ ；

(e)利用最小二乘法估计复幅度  $A$ 。

利用已得到的估计值进行参数更新，然后利用本文方法继续进行参数估计，直至估计精度满足要求。算法流程如图 2 所示。

### 5 仿真实验

#### 5.1 MATLAB 数据仿真实验

本文主要针对分割后独立散射中心进行参数估计，因此仿真时针对独立中心进行，在实际高分辨 SAR 图像中可利用已有的图像域散射中心分割方法得到独立散射中心即可。针对目前参数估计的研究现状<sup>[11-14]</sup>，在工作带宽为 1.5 GHz, 2 GHz 和 2.5 GHz, 信噪比 10-50 dB 下进行实验。选取步进调频初始频率 10 GHz, 采样点数为 64; 选取目标转角使方位分辨率与距离分辨率相近, 采样点数为 64。对于典型散射中心圆柱( $\alpha = 0.5$ )进行实验, 具体参数如表 2 所示。

按本文的方法对提取的独立散射属性中心进行估计, 对几种带宽在不同信噪比下分别进行 100 次蒙特卡洛实验, 提取散射中心参数的平均值。图 3

分别为几种带宽在不同信噪比下, 长度和位置搜索步长为 0.05 m; 角度搜索步长为 0.15° 时, 估计的幅度模值、散射中心长度、初始指向和位置与真实值之间的 RMSE(均方误差), 其定义如式(15)。式中,  $\hat{\theta}$  表示参数估计值,  $\theta$  为相应参考值,  $N$  则为实验次数。由式中可以看出, 它不仅反映与真值的误差也可反映出估计值波动, 即算法的稳健性。同时给出了频率依赖因子的正确率随信噪比的变化情况, 其中信噪比定义如式(16)。

$$RMSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\hat{\theta} - \theta)^2 \tag{15}$$

$$SNR = 10 \cdot \lg \frac{\sum |S(m, n)|^2}{\sum |N(m, n)|^2} \tag{16}$$

由图 3 可以看出, 当信噪比高于 20 dB 时, 采用本文方法估计的散射中心幅度模值、长度、初始指向角及位置与真实值的均方误差较为理想。由于属性散射中心提取技术属于 SAR 图像后处理技术<sup>[15-18]</sup>, 可利用已有的降噪算法, 使信噪比达到 20 dB 甚至更高是可行的, 因此本文提出的方法适用于滤波后的高信噪比 SAR 图像。同时, 在相同信噪比条件下, 带宽增大, 频率依赖因子估计的准确率提升较为明显。这也可由式(4)看出, 带宽越大不同频率依赖因子下的回波数据的差异就越大, 因此估计准确率也就越高。而频率依赖因子是判别目标类型的一个重要参数, 因此我们在对属性参数模型进行估计时, 要求带宽越宽越好。而属性散射模型的引入正是由于雷达高分辨的要求, 即带宽及方位积累角的增大。特别是步进频率的引入, 使得目前属性散射中心提取技术带宽一般都为 GHz 级别<sup>[15-18]</sup>, 因而带宽的要求也是可以满足的。

表 2 散射中心参数

散射中心 1(圆柱)	仿真参数
幅度 $A$	$3 e^{j60^\circ}$
$x(m)$	1.23
$y(m)$	2
$\alpha$	0.5
$L(m)$	1.28
初始指向角	$0.88^\circ$

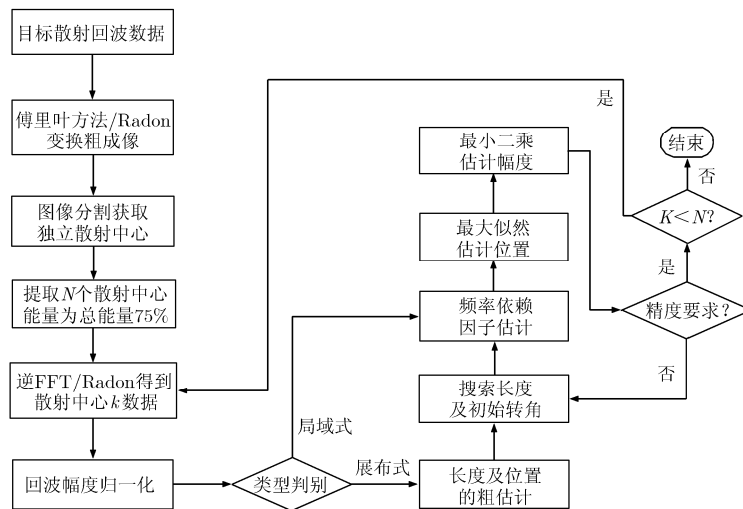


图 2 总算法流程图

### 5.2 FEKO 电磁仿真数据分析

下面以几个简单模型为例，利用 FEKO 电磁仿真软件对模型进行仿真，模型如图 4(a)所示。一根长 1.5 m 的圆柱位于(0, 0)和一个半径为 0.1 m 的球位于(0, 2)，初始频率为 1 GHz，带宽 1 GHz，采样间隔 5 MHz，观测角度为  $-30^\circ \sim 30^\circ$ ，采样间隔  $0.25^\circ$ 。由于式(2)模型是在一个 2 维的，因此这里选择在 2 维平面内进行仿真。利用大转角 radon 变换对目标进行成像如图 3(b)所示。

按照图 2 流程，利用图像分割方法对图 4(b)进行分割后，逆 radon 变换回到数据域，对数据用本文的方法进行参数估计，参数估计如表 3 所示。

利用表 3 和表 1 进行对比，我们可以得出散射中心 1 是一个长 1.6 m 位于坐标原点沿  $x$  轴的圆柱，散射中心 2 是一个位于(0,2)处的球。可以看出，散

射中心 1 位置横向偏差和长度偏差均为 0.1 m，散射中心 2 的位置偏差为  $2.7756 \times 10^{-17}$  m；其它参数估计准确。可见，也可利用本文方法对于分割后的独立散射中心进行估计。

当然，本方法是在假设散射中心相互独立的前提下，通过已有的图像域分割算法提取独立散射中心，然后对独立散射中心的数据进行分析。在实测数据，散射中心之间的耦合会使得获取的独立散射中心回波数据偏差，精度会有一定程度的下降。而目前，对于散射中心之间相互耦合关系这种较为复杂且无法进行分割的情况研究较少，是进一步研究属性散射中心参数估计的难点问题。

### 6 结论

本文提出了一种新的独立属性散射中心参数估计快速方法，在时效性和准确性上都有比较理想的

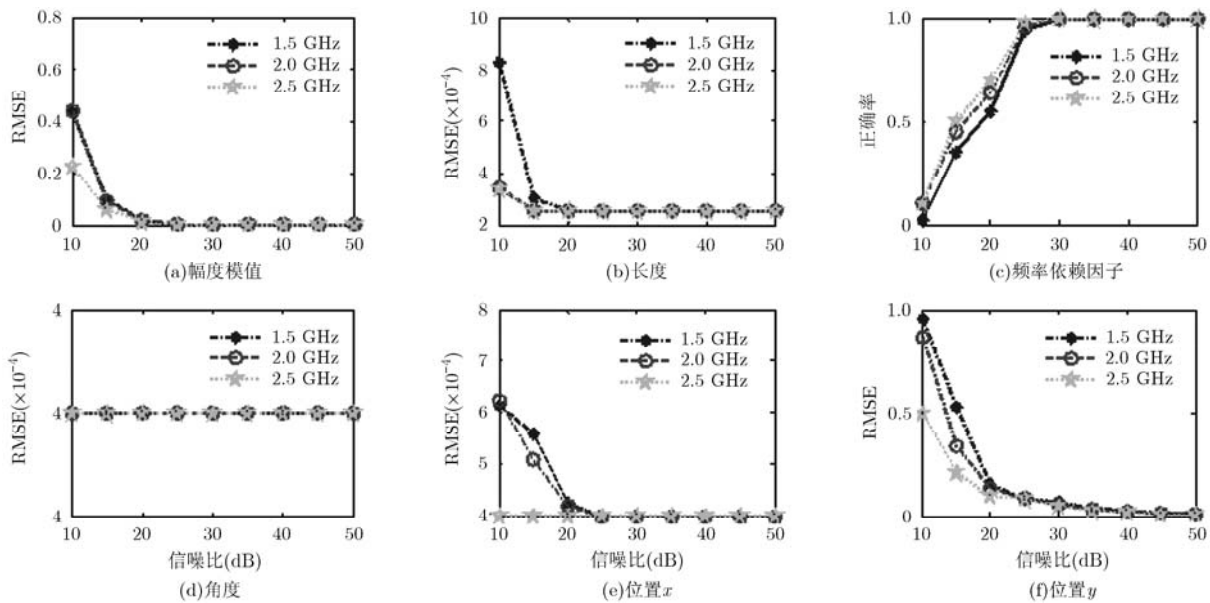


图3 带宽 1.5 GHz, 2.5 GHz 参数估计情况

表 3 利用本文方法估计仿真数据参数

散射中心	$A$	$\alpha$	$x(m)$	$y(m)$	$L(m)$	$\bar{\varphi}_0$
1	$2.4570 - 0.3162i$	0.5	-0.1	0.0	1.6	0.0
2	$2.9605 + 0.3071i$	0.0	$2.7756 \times 10^{-17}$	2.0	-	-

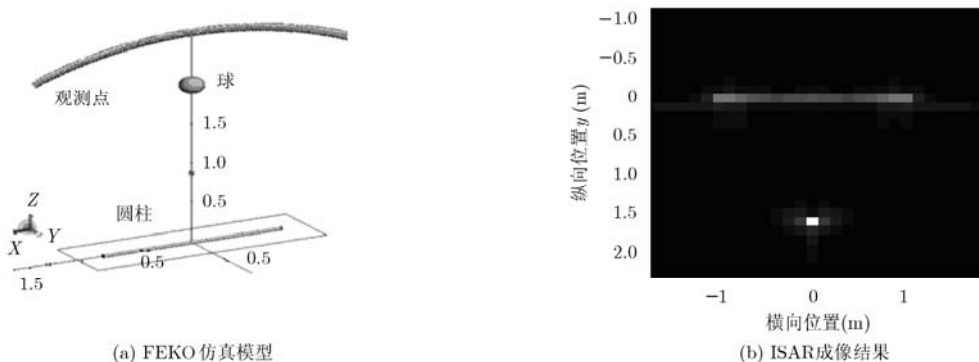


图4 大转角仿真数据成像

结果。通过将搜索目标函数进行改造, 使参数解耦合成几类参数集, 参数之间影响降低, 使得参数估计的准确性提高; 对不同的参数集同步进行估计, 从而提高估计效率。

### 参 考 文 献

- [1] Potter L C, *et al.*. A GTD-based parametric model for radar scattering [J]. *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, 1995, 43(10): 1058-1067.
  - [2] Dungan K E and Potter L C. Classifying vehicles in wide-angle radar using pyramid match hashing [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2011, 5(3): 577-591.
  - [3] 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.
  - [4] 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, Apr. 5-9, 1999: 104-115.
  - [5] 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, Ser. Proc. SPIE, Zelnio E G and Garber F D Eds., 2010, 7699: 76990Q-76990Q-12.
  - [6] Dungan K E and Potter L C. Classifying transformation-variant attributed point patterns [J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(11): 3805-3816.
  - [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] Tsar J and Steinberg B D. Reduction of side lobe and artifacts in microwave imaging: the CLEAN technique [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1988, 36(4): 543-556.
  - [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): 726-740.  
Tao Yong and Hu Wei-dong. An aspect-dependence characteristics-cased approach for parameter estimation of attribute scattering center model[J]. *Signal Processing*, 2010, 26(5): 726-740.
  - [10] 庞守宝, 张晓玲, 吴堃. 机载下视圆周 SAR 三维 BP 成像[J]. 电子科技, 2010, 23(12): 14-17.  
Pang Shou-bao, Zhang Xiao-ling, and Wu Kun. Imaging of downward-looking 3D circle SAR by BP algorithm[J]. *Electronic Science*, 2010, 23(12): 14-17.
  - [11] 石志广, 周剑雄, 赵宏钟, 等. 基于协同粒子群优化的 GTD 模型参数估计方法 [J]. 电子学报, 2007, 35(6): 1102-1107.  
Shi Zhi-guang, Zhou Jian-xiong, Zhao Hong-zhong, *et al.*. A GTD scattering center model parameter estimation method based on CPSO [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(6): 1102-1107.
  - [12] 贺冶华, 黎湘, 张旭峰, 等. 基于 MUSIC 算法的 GTD 模型参数估计[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(10): 1685-1688.  
He Zhi-hua, Li Xiang, Zhang Xu-feng, *et al.*. MUSIC-based parametric estimation of GTD model[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(10): 1685-1688.
  - [13] 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.
  - [14] 张爱兵. 高分辨率 SAR 图像复杂目标属性散射中心特征提取 [D]. [硕士论文], 国防科技大学, 2009.  
Zhang Ai-bing. Attributed scattering center extraction of complex targets in high-resolution SAR Image[D]. [Master dissertation], National Defense University, 2009.
  - [15] Koets M. Automated algorithms for extraction of physically relevant features from synthetic aperture radar imagery [D]. [Master dissertation], Columbus, OH, The Ohio State University, 1998.
  - [16] Gerry M. Two-dimensional inverse scattering centers for SAR ATR[D]. [Ph.D. dissertation], Columbus, OH, The Ohio State University, 1997.
  - [17] Wang Jun, Wei Shao-ming, Sun Jin-ping, *et al.*. A GTD model and state space approach based method for extracting the UWB scattering center of moving target [J]. *Science China*, 2011, 54(1): 182-196.
  - [18] 周剑雄, 石志广, 付强. 雷达目标散射中心参数估计的极限性能分析[J]. 电子学报, 2006, 34(4): 725-731.  
Zhou Jian-xiong, Shi Zhi-guang, and Fu Qiang. Performance analysis for scattering center parameter estimation of radar targets [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(4): 725-731.
- 段 佳: 女, 1989 年生, 博士生, 研究方向为 ISAR 超分辨成像。  
张 磊: 男, 1984 年生, 讲师, 研究方向为 SAR/ISAR 超分辨。  
盛佳恋: 女, 1987 年生, 博士生, 研究方向为稀疏 ISAR 超分辨。  
邢孟道: 男, 1975 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像和模式识别等。