

## 基于空域滤波的雷达目标二维散射中心快速提取

张肖 周建江\* 汪飞

(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 210016)

**摘要:** 针对几何绕射(GTD)模型, 该文提出一种基于空域滤波的 2 维散射中心参数快速提取方法。该方法利用空域滤波过程将 2 维散射中心参数提取问题分解为多个 1 维散射中心提取问题, 并利用 1 维旋转不变技术(1D-ESPRIT)来估计散射中心各维参数, 最后利用最小欧氏距离实现 2 维参数的配对。与基于 2 维旋转不变技术(2D-ESPRIT)的方法相比, 该方法避免了高维数的特征值分解, 因而可以显著地降低计算的复杂度。仿真实验表明, 与 2D-ESPRIT 高分辨算法相比, 该方法不仅能够显著降低计算量, 并且还能获得较好的估计精度, 可以有效地用于提取目标散射中心参数信息。

**关键词:** 雷达; 散射中心; 几何绕射(GTD)模型; 空域滤波; 旋转不变技术

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)03-0523-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00365

## Fast Extraction of Radar Target 2D Scattering Centers Based on Spatial Filtering

Zhang Xiao Zhou Jian-jiang Wang Fei

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** For a model derived from the Geometrical Theory of Diffraction (GTD), a fast method based on spatial filtering is proposed to extract parameters of two-dimensional scattering centers. The proposed method utilizes spatial filtering process to decompose two-dimensional scattering centers extraction into several times of one-dimensional scattering centers extraction, in which the one-dimensional Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques (ESPRIT) is employed to estimate the parameters of scattering centers for each dimensional independently. Finally, the pair-matching of two-dimensional parameters is accomplished by searching the minimums of Euclidean distance. Compared with the method based on two-dimensional ESPRIT, the proposed method does not need high-dimensional eigenvalue decomposition, thus the computational complexity is significantly reduced. Simulation results show that the proposed method not only reduces greatly the computational burden, but also keeps high accuracy of parameter estimation compared with 2D-ESPRIT algorithm, and it is proved to be effective in scattering center extraction.

**Key words:** Radar; Scattering center; Geometric Theory of Diffraction (GTD) model; Spatial filtering; Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques (ESPRIT)

### 1 引言

当雷达工作在高频区域时, 获得的目标回波可以认为是目标局部散射源电磁散射的相干合成, 这些局部性的散射源就被称为目标的散射中心。利用若干孤立的散射中心就可以较准确地表征复杂目标在高频区的散射, 这对于深入研究复杂目标的电磁散射机理具有重要的意义<sup>[1]</sup>。散射中心包含有目标强散射点所在的位置、散射的强度以及目标结构特征等信息, 利用这些信息进行目标识别是自动目标识

别(ATR)领域的一个研究热点<sup>[2-6]</sup>。

目前, 提取 2 维散射中心的方法主要有基于稀疏表示的方法, 2D-MUSIC 方法, 2D-ESPRIT 方法等<sup>[7-11]</sup>。文献[7]和文献[8]提出用基于稀疏表示的方法来提取散射中心, 这类方法都无需预估计散射中心的数目, 且在频带缺失和非均匀采样时仍然有效, 但是由于要进行迭代运算, 因此计算量较大。文献[9]提出的 2D-MUSIC 方法充分利用了信号子空间和噪声子空间的正交性, 具有较高的估计精度和分辨率。但是, 2D-MUSIC 算法需要进行 2 维的谱峰搜索, 因而在高维参数估计中, 实时性较差。针对 2D-MUSIC 算法的不足, 文献[10]提出用 2D-ESPRIT 方法来提取散射中心, 该方法利用了信

2013-03-22 收到, 2013-11-22 改回

国家级基金和江苏高校优势学科建设工程资助课题

\*通信作者: 周建江 zx6632910@hotmail.com

号子空间的旋转不变性来进行参数估计,从而避免了复杂的谱峰搜索过程。但是,2D-ESPRIT算法仍需要进行高维数增广矩阵的特征值分解,在观测数据矩阵较大时,仍需要较大的计算量。

本文主要针对几何绕射(GTD)模型<sup>[12]</sup>,提出了一种基于空域滤波的散射中心提取方法。该方法利用空域滤波将2维散射中心提取分解为多个1维散射中心提取的问题,并用1D-ESPRIT分别对各维参数进行估计,最后根据位置参数粗估计与精确估计之间的近似关系,通过最小欧氏距离实现配对。因此,本文方法无需构造高维数的增广矩阵,从而避免了高维数的特征值分解,大大降低了计算量。

## 2 2维 GTD 散射模型

以频率步进雷达为例,根据几何绕射理论(GTD),在宽带小转角条件下,忽略角度依赖性,目标总的回波可以表示为<sup>[10]</sup>

$$E(m, n) = \sum_{i=1}^d A_i \left( j \frac{f_m}{f_0} \right)^{\alpha_i} \cdot \left\{ \exp \left[ j \frac{-4\pi f_m}{c} (x_i \cos \theta_n + y_i \sin \theta_n) \right] \right\} + w(m, n) \quad (1)$$

其中  $E(m, n)$  表示目标总的散射回波;  $w(m, n)$  表示零均值复高斯白噪声,其方差为  $\sigma_w^2$ ;  $d$  表示散射中心个数;  $c$  表示光速;  $A_i$  表示复散射强度系数;  $f_m = f_0 + m\Delta f$ ,  $m=0, 1, \dots, M-1$  表示频率步进雷达的发射频率;  $\theta_n = n\Delta\theta$ ,  $n=0, 1, \dots, N-1$  表示视角;  $x_i$  和  $y_i$  分别表示第  $i$  个散射中心相对参考中心的距离向坐标和方位向坐标;  $\alpha_i$  表示散射中心的频率依赖因子。根据 GTD 理论,  $\alpha$  的取值应为  $1/2$  的整数倍:  $\alpha=1$  为平板、二面角散射;  $\alpha=1/2$  为单曲面散射;  $\alpha=0$  为点、双曲面或直边镜面散射;  $\alpha=-1/2$  为边缘绕射;  $\alpha=-1$  为尖顶绕射。

经极坐标插值后回波数据可以近似为

$$E(m, n) = \sum_{i=1}^d A_i \left( j \frac{f_m}{f_0} \right)^{\alpha_i} \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi f_m}{c} x_i - j \frac{4\pi f_c \theta_n}{c} y_i \right] + w(m, n) \quad (2)$$

其中  $f_c = f_0 + (M-1)\Delta f/2$ 。将式(2)写成矩阵形式为

$$\mathbf{E} = \mathbf{A}\mathbf{S}\mathbf{B}^H + \mathbf{W} \quad (3)$$

其中  $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\alpha_1, x_1), \mathbf{a}(\alpha_2, x_2), \dots, \mathbf{a}(\alpha_d, x_d)]$  为  $M \times d$  维矩阵,  $\mathbf{B} = [\mathbf{b}(y_1), \mathbf{b}(y_2), \dots, \mathbf{b}(y_d)]$  为  $N \times d$  维矩阵,  $\mathbf{a}(\alpha_i, x_i) = [1, (f_1/f_0)^{\alpha_i} \exp(-j4\pi\Delta f x_i/c), \dots, (f_{M-1}/f_0)^{\alpha_i} \exp(-j4\pi\Delta f x_i(M-1)/c)]^T$ ,  $\mathbf{b}(y_i) = [1, \exp(j4\pi f_c \Delta\theta y_i/c), \dots, \exp(j4\pi f_c \Delta\theta y_i(N-1)/c)]^T$ ,  $\mathbf{S} = \text{diag}_{1 \leq k \leq d} \{s_k\}$

为  $d \times d$  维对角矩阵,  $s_i = A_i j^{\alpha_i} \exp(-j4\pi f_0 x_i/c)$ ;  $\mathbf{W}$  为 2 维高斯白噪声。

## 3 基于 GTD 模型的 2 维散射中心快速提取方法

### 3.1 基于空域滤波的位置参数及类型参数的快速估计

**3.1.1 位置参数的粗估计** 在相对带宽较小时,可以认为  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}$  均具有旋转不变性,因此可以采用 1 维旋转不变算法(1D-ESPRIT)来获得距离向和方位向位置参数的估计<sup>[13]</sup>。1D-ESPRIT 算法首先需要对自相关矩阵进行估计,为了避免自相关矩阵出现秩亏缺,本文在距离向上采用前向空间平滑来估计自相关矩阵  $\mathbf{R}_x^F$ ,在方位向上采用前后向空间平滑来估计自相关矩阵  $\mathbf{R}_y^{\text{FB}}$ ,如式(4)所示。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{R}_x^F &= \frac{1}{N(M-P+1)} \sum_{k=1}^{M-P+1} \mathbf{J}_{x,k} \mathbf{E} \mathbf{E}^H \mathbf{J}_{x,k}^H \\ &= \mathbf{A}_{\text{sub}} \mathbf{S}_x \mathbf{A}_{\text{sub}}^H + \sigma_w^2 \mathbf{I} \\ \mathbf{R}_y^{\text{FB}} &= \frac{1}{2M(N-Q+1)} \\ &\cdot \sum_{k=1}^{N-Q+1} \left( \mathbf{J}_{y,k} \mathbf{E}^H \mathbf{E} \mathbf{J}_{y,k}^H + \mathbf{T} \left( \mathbf{J}_{y,k} \mathbf{E}^H \mathbf{E} \mathbf{J}_{y,k}^H \right)^* \mathbf{T} \right) \\ &= \mathbf{B}_{\text{sub}} \mathbf{S}_y \mathbf{B}_{\text{sub}}^H + \sigma_w^2 \mathbf{I} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中  $\mathbf{J}_{x,k} = [\mathbf{0}_{P \times (k-1)} \quad \mathbf{I}_P \quad \mathbf{0}_{P \times (M-P-k+1)}]_{P \times M}$ ,  $\mathbf{J}_{y,k} = [\mathbf{0}_{Q \times (k-1)} \cdot \mathbf{I}_Q \quad \mathbf{0}_{Q \times (N-Q-k+1)}]_{Q \times N}$ ,  $\mathbf{A}_{\text{sub}} = \mathbf{J}_{x,1} \mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}_{\text{sub}} = \mathbf{J}_{y,1} \mathbf{B}$ ,  $\mathbf{T}$  为转置矩阵,  $\mathbf{S}_x$  和  $\mathbf{S}_y$  均为非奇异矩阵,  $P$  和  $Q$  为滑动窗口长度。分别对自相关矩阵  $\mathbf{R}_x^F$  和  $\mathbf{R}_y^{\text{FB}}$  进行特征值分解得到信号子空间  $\mathbf{U}_x^s$  和  $\mathbf{U}_y^s$ ,再利用信号子空间的旋转不变性,就可获得距离向和方位向位置参数的估计,如式(5)所示。

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}_i &= -\frac{\arg[\lambda_i((\mathbf{U}_x^s)^+ \bar{\mathbf{U}}_x^s)] \times c}{4\pi\Delta f}, \quad i=1, \dots, p \\ \bar{y}_l &= \frac{\arg[\lambda_l((\mathbf{U}_y^s)^+ \bar{\mathbf{U}}_y^s)] \times c}{4\pi f_c \Delta\theta}, \quad l=1, \dots, q \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中  $\mathbf{U}_x^s$  和  $\mathbf{U}_y^s$  分别由  $\mathbf{U}_x^s$  和  $\mathbf{U}_y^s$  删去最后一行得到,  $\bar{\mathbf{U}}_x^s$  和  $\bar{\mathbf{U}}_y^s$  分别由  $\mathbf{U}_x^s$  和  $\mathbf{U}_y^s$  删去第一行得到;  $p$  和  $q$  分别表示在距离向和方位向上可分辨的散射中心数;上标“+”表示求矩阵的伪逆,  $\lambda_l(\cdot)$  表示矩阵的第  $l$  个特征值,  $\arg(\cdot)$  表示求相位角。

由于在多数情况下,各散射中心在距离向或方位向上的位置相近,此时以上方法可能无法单独在距离向或方位向上分辨这些相近散射中心,从而导致无法获得精确的距离向或方位向位置参数估计。所以由式(5)得到的只是位置参数的粗估计,且不是一一对应的。

**3.1.2 空域滤波分组** 根据式(5)得到的两组散射中心位置参数的粗估计, 可以构造相应的空域滤波器组:

$$\begin{cases} \mathbf{w}_i^x = \mathbf{P}_i^x \mathbf{a}(\bar{x}_i), & i = 1, 2, \dots, p \\ \mathbf{w}_l^y = \mathbf{P}_l^y \mathbf{b}(\bar{y}_l), & l = 1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (6)$$

其中  $\mathbf{P}_i^x = \mathbf{I} - \tilde{\mathbf{A}}_i (\tilde{\mathbf{A}}_i^H \tilde{\mathbf{A}}_i)^{-1} \tilde{\mathbf{A}}_i^H$ ,  $\mathbf{P}_l^y = \mathbf{I} - \tilde{\mathbf{B}}_l (\tilde{\mathbf{B}}_l^H \tilde{\mathbf{B}}_l)^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{B}}_l^H$ ,  $\tilde{\mathbf{A}}_i = [\mathbf{a}(\bar{x}_1), \mathbf{a}'(\bar{x}_1), \dots, \mathbf{a}(\bar{x}_{i-1}), \mathbf{a}'(\bar{x}_{i-1}), \mathbf{a}(\bar{x}_{i+1}), \mathbf{a}'(\bar{x}_{i+1}), \dots, \mathbf{a}(\bar{x}_p), \mathbf{a}'(\bar{x}_p)]$ ,  $\tilde{\mathbf{B}}_l = [\mathbf{b}(\bar{y}_1), \mathbf{b}'(\bar{y}_1), \dots, \mathbf{b}(\bar{y}_{l-1}), \mathbf{b}'(\bar{y}_{l-1}), \mathbf{b}(\bar{y}_{l+1}), \mathbf{b}'(\bar{y}_{l+1}), \dots, \mathbf{b}(\bar{y}_q), \mathbf{b}'(\bar{y}_q)]$ ,  $\mathbf{a}'(\bar{x}_i) = [0, (-j4\pi\Delta f/c) \exp(-j4\pi\Delta f \bar{x}_i/c), \dots, (-j4\pi\Delta f(M-1)/c) \exp(-j4\pi\Delta f \bar{x}_i(M-1)/c)]^T$  为  $\mathbf{a}(\bar{x}_i)$  的一阶导数,  $\mathbf{b}'(\bar{y}_l) = [0, (j4\pi f_c \Delta \theta/c) \exp(j4\pi f_c \Delta \theta \bar{y}_l/c), \dots, (j4\pi f_c \Delta \theta(N-1)/c) \exp(j4\pi f_c \Delta \theta \bar{y}_l(N-1)/c)]^T$  为  $\mathbf{b}(\bar{y}_l)$  的一阶导数。这里利用了高阶导数来加宽空域滤波器的零陷宽度<sup>[14]</sup>, 增强其滤波性能, 尽可能地减少残留干扰<sup>[15]</sup>。

利用式(6)得到的空域滤波器组对原数据矩阵进行滤波分组, 可得

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_i^x &= \mathbf{E}^H \mathbf{w}_i^x = \mathbf{B} \mathbf{S}^H \mathbf{A}^H \mathbf{w}_i^x + \mathbf{W} \mathbf{w}_i^x \\ &\approx \mathbf{B}_i^x \mathbf{S}_i^{xH} \mathbf{A}_i^{xH} \mathbf{w}_i^x + \mathbf{W}^x, \quad i = 1, 2, \dots, p \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_l^y &= \mathbf{E} \mathbf{w}_l^y = \mathbf{A} \mathbf{S} \mathbf{B}^H \mathbf{w}_l^y + \mathbf{W} \mathbf{w}_l^y \\ &\approx \mathbf{A}_l^y \mathbf{S}_l^y \mathbf{B}_l^{yH} \mathbf{w}_l^y + \mathbf{W}^y, \quad l = 1, 2, \dots, q \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $\mathbf{W}^x = \mathbf{W} \mathbf{w}_i^x$  和  $\mathbf{W}^y = \mathbf{W} \mathbf{w}_l^y$  仍为白噪声。由于  $|\mathbf{a}(\bar{x}_j)^H \mathbf{w}_i^x| \approx 0, j = 1, 2, \dots, p, j \neq i$ , 因此经过式(7)所示距离向空域滤波后, 新的数据向量  $\mathbf{E}_i^x$  中仅包含在距离向上与  $\bar{x}_i$  相近的散射中心, 这些散射中心在方位向上将具有较好的可分辨性。由式(8)也可以得出类似的结论。因此根据式(7)和式(8)得到数据向量组, 就可以获得散射中心位置参数及类型参数的精确估计。

**3.1.3 位置参数及类型参数精确估计** 与 3.1.1 节中类似, 根据式(7)和式(8)获得的两组数据向量, 利用空间平滑就可以得到两组相应的自相关矩阵  $\mathbf{R}_{x,i}^{\text{FB}}$  和  $\mathbf{R}_{x,l}^{\text{F}}$ , 再采用 1D-ESPRIT 算法就可以获得相应的方位向和距离向位置的精确估计  $\{\hat{y}_{i,j}\}, j = 1, 2, \dots, \rho_i, i = 1, 2, \dots, p$  和  $\{\hat{x}_{l,k}\}, k = 1, 2, \dots, t_l, l = 1, 2, \dots, q, \rho_i$  和  $t_l$  分别表示  $\mathbf{E}_i^x$  和  $\mathbf{E}_l^y$  所包含的散射中心数,  $\sum_{i=1}^p \rho_i = d, \sum_{l=1}^q t_l = d$ 。在距离向位置确定以后, 可以利用信号子空间与噪声子空间的正交性, 实现散射中心类型参数的估计。定义如下代价函数:

$$f_l(\alpha) = \frac{\mathbf{a}_{\text{sub}}(\alpha, \hat{x}_{l,k})^H \mathbf{a}_{\text{sub}}(\alpha, \hat{x}_{l,k})}{\mathbf{a}_{\text{sub}}(\alpha, \hat{x}_{l,k})^H \mathbf{U}_{x,l}^n \mathbf{U}_{x,l}^{nH} \mathbf{a}_{\text{sub}}(\alpha, \hat{x}_{l,k})}, \quad l = 1, 2, \dots, q \quad (9)$$

其中  $\mathbf{U}_{x,l}^n$  为  $\mathbf{R}_{x,l}^{\text{F}}$  的噪声子空间。使式(9)所示代价函数最大的  $\alpha$  值就是距离向位置估计  $\{\hat{x}_{l,k}\}, k = 1, 2, \dots, t_l, l = 1, 2, \dots, q$  对应的类型参数的估计  $\{\hat{\alpha}_{l,k}\}, k = 1, 2, \dots, t_l, l = 1, 2, \dots, q$ 。

**3.1.4 配对过程** 通过以上步骤只可以获得两组相互独立的散射中心参数估计  $\{(\hat{\alpha}_i, \hat{x}_i, \hat{y}_i)\}, i = 1, 2, \dots, d$  和  $\{(\bar{x}_j, \hat{y}_j)\}, j = 1, 2, \dots, d$ , 精确估计之间并没有一一对应关系, 因此需要对其进行配对。对于同一个散射中心来说, 其位置参数的粗估计应近似于精确估计, 即有  $\bar{x} \approx \hat{x}, \bar{y} \approx \hat{y}$ 。利用这一性质, 通过最小欧氏距离, 就可以实现精确估计之间的配对, 具体过程如下:

$$d(i, j) = \sqrt{(\hat{x}_i - \bar{x}_j)^2 + (\hat{y}_i - \hat{y}_j)^2} \quad (10)$$

固定  $(\hat{\alpha}_i, \hat{x}_i, \hat{y}_i)$ , 将  $\{(\bar{x}_j, \hat{y}_j)\}, j = 1, 2, \dots, d$  分别代入式(10), 使欧氏距离  $d(i, j)$  最小的  $\hat{y}_j$  就是  $(\hat{x}_i, \hat{\alpha}_i)$  对应的散射中心方位向位置的精确估计。

### 3.2 算法流程以及计算量分析

综上所述, 本文方法可以总结为以下几个步骤:

(1) 根据散射回波数据, 利用空间平滑和 1D-ESPRIT 算法, 获得散射中心位置参数的粗估计  $\{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_p\}$  和  $\{\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_q\}$ ;

(2) 利用式(6)构造两组空域滤波器  $\{\mathbf{w}_1^x, \mathbf{w}_2^x, \dots, \mathbf{w}_p^x\}$  和  $\{\mathbf{w}_1^y, \mathbf{w}_2^y, \dots, \mathbf{w}_q^y\}$ , 根据式(7)和式(8)对原数据矩阵进行空域滤波分组;

(3) 根据滤波后的两组数据向量, 利用空间平滑和 1D-ESPRIT 算法, 获得散射中心方位向位置的精确估计  $\{\hat{y}_{i,j}\}, j = 1, 2, \dots, \rho_i, i = 1, 2, \dots, p$  和散射中心距离向位置以及类型参数的精确估计  $\{(\hat{\alpha}_{l,k}, \hat{x}_{l,k})\}, k = 1, 2, \dots, t_l, l = 1, 2, \dots, q$ ;

(4) 利用式(10), 实现散射中心参数精确估计之间的配对;

(5) 最后利用最小二乘法, 得到散射中心散射强度的估计。

接下来, 对本文方法的计算量进行分析。为了不失一般性, 假设采样数  $M = N$ , 滑动窗口长度  $P = Q = M/2 \geq d$ , 在散射中心数目  $d$  分别为 10, 25 和 40 时, 比较本文方法与 2D-ESPRIT 方法<sup>[10]</sup>所需复乘运算量随采样点数  $M$  的变化, 如图 1 所示。可见, 与 2D-ESPRIT 方法相比, 本文方法显著地降低了计算的复杂度, 这一点在采样点数较大时尤为明显。

## 4 仿真实验及性能分析

为了验证本文方法的有效性, 对本文方法和 2D-ESPRIT 方法<sup>[10]</sup>的估计性能作了仿真实验研究。

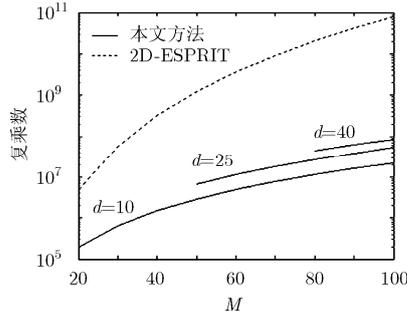


图 1 复乘运算量比较

仿真 1 比较了在不同带宽、不同信噪比下两种方法的估计精度；仿真 2 验证了本文方法对复杂目标回波数据的有效性。

**仿真 1** 选取步进雷达的起始频率为 9 GHz，工作带宽分别为 400 MHz 和 600 MHz，频率采样点数均为  $M=50$ ；目标相对雷达转角为  $1.5^\circ$ ，角度采样点数为  $N=50$ 。根据表 1 所示散射中心参数，生成目标回波。在仿真时，选择滑动窗口长度  $P=Q=25$ 。假设噪声为零均值复高斯白噪声，定义信噪比 SNR 为目标回波信号功率与噪声功率之比，平均

均方根误差为  $\text{ARMSE}(\theta) = \sqrt{\text{E} \left\{ \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d |\hat{\theta}_i - \theta_i|^2 \right\}}$ 。进

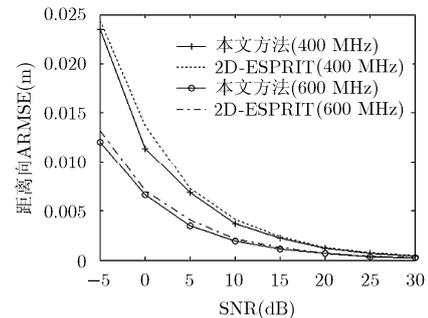
行 100 次蒙特卡罗仿真，比较两种方法在不同带宽、不同信噪比条件下提取散射中心各参数的平均均方根误差，如图 2~图 5 所示。

表 1 散射中心参数取值

序号	距离向位置 $x(\text{m})$	方位向位置 $y(\text{m})$	散射中心类 型参数 $\alpha$	散射强 度 $A$
1	-1.00	-1.00	-1.0	1
2	-0.95	0	1.0	1
3	-1.00	1.00	-1.0	1
4	1.00	1.08	-0.5	1
5	1.05	-1.00	0.5	1
6	3.00	-1.00	0	1
7	-0.50	1.03	0	1

图 2 和图 3 分别为不同带宽、不同信噪比下，用两种方法估计距离向位置和方位向位置的平均均方根误差。可见，两种方法都可以获得较好的散射中心位置参数估计精度且都配对正确，在信噪比为 -5 dB 时，位置参数的估计误差仍然在一个距离分辨单元内。从图 3 可以看出，本文方法对方位向位置的估计性能优于 2D-ESPRIT 方法，在信噪比较低时尤其明显。这是因为本文方法在对方位向位置

进行精确估计时，利用了前后向空间平滑技术，从而更加充分地利用了观测数据，进而提高了方位向位置估计的精度。图 4 所示为不同带宽、不同信噪比下，两种方法估计散射中心类型参数的平均正确率，可以看出本文方法与 2D-ESPRIT 算法的散射类型平均估计正确率相近，且都受带宽和噪声的影响较大，只有在较大带宽或较高的信噪比下才能全部正确估计。图 5 为不同带宽、不同信噪比下，两种方法提取的散射中心散射强度平均均方根误差。可见，两种方法都可以较准确地估计出散射中心的散射强度。

图 2 400 MHz 和 600 MHz 带宽下  
距离向位置估计的平均均方根误差

**仿真 2** 选取南京航空航天大学目标特性研究中心提供的 AMG158 导弹模型回波数据作为实验数据，测量条件为：起始频率为 9 GHz，带宽为 800 MHz，频率采样点数均为  $M=51$ ；观测方位角范围为  $12.5^\circ \sim 17.5^\circ$  (机头方向为  $0^\circ$ )，采样点数为  $N=51$ 。

图 6 所示为该模型的 2 维傅里叶变换成像结果。由于带宽和转角的限制，导致成像分辨率较低。图 7 和图 8 所示分别为采用 2D-ESPRIT 算法和本文方法得到的散射中心位置参数。从图 7 和图 8 不难看出，本文方法与 2D-ESPRIT 算法得到的散射中心位置基本一致，且两种方法得到的散射中心位置均与目标 2 维傅里叶变换成像结果吻合良好。表 2 所示为本文方法的估计结果，可见所提取的散射中心能较为准确地反映目标的尺寸以及强弱散射中心的分布。实验结果很好地验证了本文方法对复杂目标回波数据的有效性。

## 5 结论

本文采用了能够精确描述目标高频电磁散射特性的 GTD 模型来表征雷达目标的散射特性。并针对 GTD 模型，提出了一种高估计精度、低运算复杂度的散射中心参数快速提取方法。该方法利用 1D-ESPRIT 的高分辨特性和空域滤波分组技术实

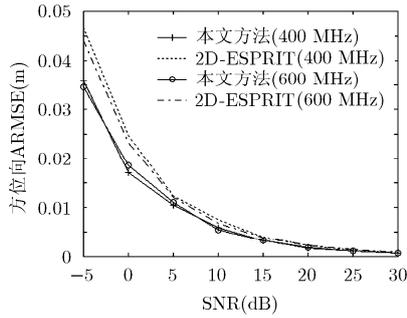


图 3 400 MHz 和 600 MHz 带宽下方方位向位置估计的平均均方根误差

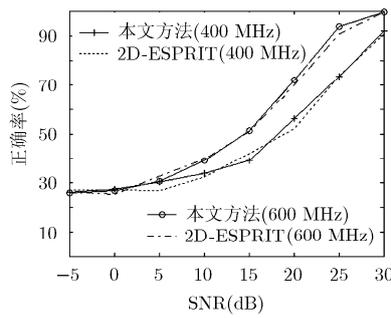


图 4 400 MHz 和 600 MHz 带宽下类型参数估计的平均正确率

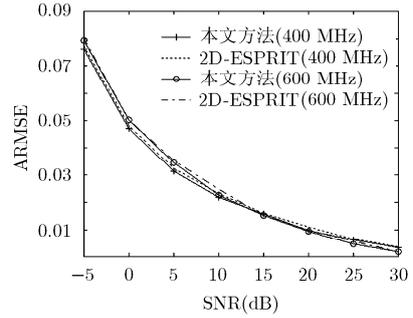


图 5 400 MHz 和 600 MHz 带宽下散射强度估计的平均均方根误差

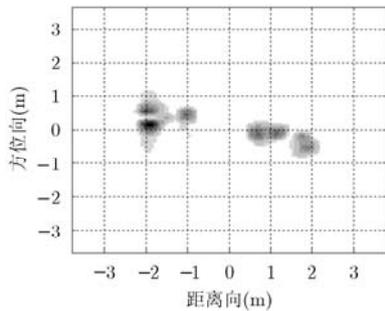


图 6 2 维傅里叶变换成像结果

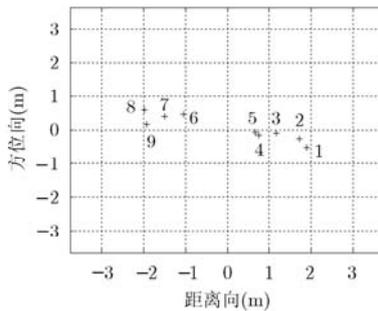


图 7 2D-ESPRIT 算法提取结果

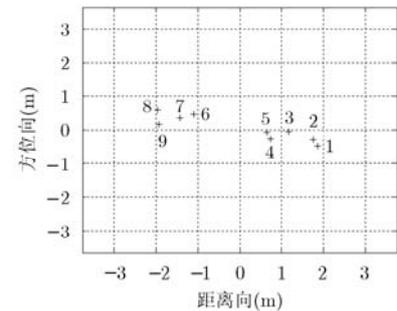


图 8 本文方法提取结果

表 2 本文方法的参数估计结果

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
距离向位置(m)	1.8596	1.7474	1.1741	0.7353	0.6548	-1.1017	-1.4333	-1.9680	-1.9273
方位向位置(m)	-0.4722	-0.2827	-0.0546	-0.2722	-0.0850	0.4593	0.3532	0.5871	0.1583
归一化强度	0.4074	0.7869	0.6647	0.2640	0.7031	0.6534	0.5023	0.9866	1.0000

现了 2 维散射中心参数的估计，避免了高维数的特征值分解，实现了散射中心的位置、类型以及散射强度的快速估计。从仿真实验可以看出，相比 2D-ESPRIT 算法，本文方法不仅具有相似的估计性能，而且显著地降低了计算运算量，同时利用前后向空间平滑技术提高了方位向位置的估计精度，并且在遇到散射中心距离向位置或方位向位置重复或近似时，同样能够实现正确的配对。

参 考 文 献

[1] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005, 3: 229-278.

[2] Zhou Jian-xiong, Shi Zhi-guang, Xiao Cheng, et al. Automatic target recognition of SAR images based on global scattering center model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3713-3729.

[3] 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.

[4] Gudnason J, Cui Jing-jing, and Brookes M. HRR automatic target recognition from superresolution scattering center features[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 54(4): 1512-1524.

[5] 唐涛, 粟毅. 散射中心特征序贯匹配的 SAR 图像目标识别方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2012, 34(6): 1131-1135. Tang Tao and Su Yi. Object recognition in SAR imagery using sequential feature matching of scattering centers[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(6): 1131-1135.

[6] Ismail J. Scattering features for target recognition using finite rate of innovation model[C]. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI2012)*, Chicago, 2012: 1-2.

[7] 叶帆, 何峰, 张永胜, 等. 基于 GTD 模型的多雷达信号二维融合[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(1): 55-59. Ye Fan, He Feng, Zhang Yong-sheng, et al. Two-dimensional

- fusion of multi-radar signals based on GTD model[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(1): 55-59.
- [8] 周剑雄, 石志广, 胡磊, 等. 基于频率稀疏非均匀采样的雷达目标一维高分辨成像[J]. 电子学报, 2012, 40(5): 926-934.  
Zhou Jian-xiong, Shi Zhi-guang, Hu Lei, *et al.*. Radar target one dimensional high resolution imaging based on sparse and non-uniform samplings in frequency domain[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(5): 926-934.
- [9] Quinquis A, Radoi E, *et al.*. Some radar imagery results using superresolution techniques[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, 52(5): 1230-1244.
- [10] 王菁, 周建江, 汪飞. 基于 GTD 模型的目标二维散射中心提取[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 958-962.  
Wang Jing, Zhou Jian-jiang, and Wang Fei. 2D scattering centers extraction of objects based on GTD model[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(4): 958-962.
- [11] Wei Shao-ming, Yu Juan, *et al.*. State space processing based approach for extracting scattering center parameters of high resolution SAR target[J]. *Journal of Convergence Information Technology*, 2012, 7(12): 43-51.
- [12] Potter L C, Chiang Da-ming, *et al.*. A GTD-based parametric model for radar scattering[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1995, 43(10): 1058-1067.
- [13] Roy R and Kailath T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1989, 37(7): 984-995.
- [14] Li Ming-hui and Lu Yi-long. Dimension reduction for array processing with robust interference cancellation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 103-112.
- [15] Lin Jen-der, Fang Wen-hsien, Wang Yung-yi, *et al.*. FSF-MUSIC for joint DOA and frequency estimation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(12): 4529-4542.
- 张 肖: 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理等.
- 周建江: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达信号处理、目标特征的提取与控制.
- 汪 飞: 男, 1976 年生, 博士, 副教授, 研究方向为谱分析、信号特征参量估计等.