

## 基于属性散射中心模型的 SAR 目标重构可视化增强方法

丁柏圆\* 钟金荣 马聪慧 文贡坚  
(国防科技大学 ATR 重点实验室 长沙 410073)

**摘要:** 基于属性散射中心模型对实测 SAR 数据进行参数估计, 利用参数估计的结果对实测 SAR 目标重构可视化增强对于辅助 SAR 解译人员进行判别具有重要的意义。该文提出了一种新的可视化增强方法, 利用成像操作 (IFFT) 的线性特征, 在参数估计的基础上, 基于属性散射中心模型分别对各个散射中心自适应成像, 最后叠加重构整幅 SAR 图像。实验结果表明, 该方法可以有效提高目标重构的可视化效果。

**关键词:** 属性散射中心模型; 参数估计; SAR 解译; 自适应成像; 目标重构; 可视化增强

中图分类号: TP753

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2013)04-0499-08

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2013.13071

## SAR Target Reconstruction Visualization Enhancement Based on Attributed Scattering Center Model

Ding Bo-yuan Zhong Jin-rong Ma Cong-hui Wen Gong-jian  
(ATR Key Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** It has important meaning for Synthetic Aperture Radar (SAR) interpretation to estimate parameters from measured SAR data and visualize the SAR imagery. For the linearity of IFFT, single scattering center can be individually imaged adaptively to form an overall image. Thus, the side effects of side lobes and windowing can be decreased and the quality of the SAR imagery can be improved. The efficiency of the method is confirmed by the test based on the simulated data.

**Key words:** Attributed scattering model; Parameter estimation; SAR interpretation; Adaptive imaging; Target reconstruction; Visualization enhancement

### 1 引言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 在目标识别中发挥重要的作用, 具有全天时、全天候的巨大优势。属性散射中心模型被用于从 SAR 图像中提取特征。根据电磁理论, 复杂目标在高频区的电磁散射响应可以看做为单个散射中心的散射响应之和<sup>[1-3]</sup>。属性散射中心模型较好地描述了目标在 SAR 数据上的散射特性, 为 SAR 图像的解译提供一种重要的工具<sup>[4,5]</sup>。

基于属性散射中心模型可以对实测 SAR 图像进行参数估计, 在此基础上可以重构 SAR 图像以增强目标重构的可视化效果。传统的重构方法是利用参数估计的结果重构频域数据, 利用 IFFT 对其进行成像, 达到重构 SAR 目标的目的。在该方法中由于成像过程中的加窗处理造成图像分辨率下降导致

距离较近的散射中心无法区分, 若是不加窗则强散射中心的旁瓣会掩盖弱散射中心, 使得目标的弱散射中心不能在重构图像中体现出来。这些都会制约 SAR 目标重构可视化效果的增强。

为解决上述问题, 本文提出了一种新的可视化增强方法。在重构图像的过程中, 基于属性散射中心模型, 对每个估计得到的散射中心根据其属性参数分别采取自适应的成像方法, 最后利用成像过程的线性特征将多个散射中心的成像结果进行叠加得到最终的重构图像。此过程中既可以避免传统方法加窗处理导致的分辨率下降也可以减弱强散射中心的旁瓣对弱散射中心的掩盖。实验结果表明, 该算法可以有效提高目标重构的可视化效果。

### 2 目标的属性散射中心模型

属性散射中心模型是 Moses Randolph L 等基于几何绕射理论和物理光学理论提出的描述高频区复杂目标散射特性的参数模型<sup>[1]</sup>, 目标的电磁散射响应可以认为是  $p$  个独立的散射中心叠加而成, 具体形式如下:

2013-07-29 收到, 2013-10-22 改回; 2013-11-08 网络优先出版

国家部委基金资助课题

\*通信作者: 丁柏圆 867525501@qq.com

$$E(f, \phi; \boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^p E_i(f, \phi; \boldsymbol{\theta}_i)$$

$$E_i(f, \phi; \boldsymbol{\theta}_i) = A_i \cdot \left( j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_i} \cdot \exp \left( \frac{-j4\pi f}{c} (x_i \cos \phi + y_i \sin \phi) \right) \cdot \text{sinc} \left( \frac{2\pi f}{c} L_i \sin(\phi - \bar{\phi}_i) \right) \cdot \exp(-2\pi f \gamma_i \sin \phi) \quad (1)$$

$\boldsymbol{\theta}^T = [\boldsymbol{\theta}_1^T, \boldsymbol{\theta}_2^T, \dots, \boldsymbol{\theta}_p^T]$  表示目标的  $p$  个散射中心的参数集,  $E_i(f, \phi; \boldsymbol{\theta}_i)$  表示单个散射中心的后向散射场, 是关于频率  $f$  和方位角  $\phi$  以及散射中心参数集  $\boldsymbol{\theta}_i = [A_i, \alpha_i, x_i, y_i, L_i, \bar{\phi}_i, \gamma_i]$  的函数。  $x_i, y_i$  分别表示散射中心方位向、距离向的位置,  $A_i$  表示幅度,  $\alpha_i$  是频率依赖因子,  $L_i$  是散射中心长度,  $\bar{\phi}_i$  是散射中心方向角,  $\gamma_i$  表示散射中心对方向角  $\phi$  的方向依赖性。当  $L_i = \bar{\phi}_i = 0$  时, 表示该散射中心是局部散射中心, 当  $L_i \neq 0, \gamma_i = 0$  时, 表示该散射中心是展布式散射中心。

### 3 方法原理

基于属性散射中心模型的 SAR 图像重构对于 SAR 图像的可视化增强具有重要的意义。该方法从原始 SAR 回波数据出发, 通过对 SAR 数据进行参数估计, 得到各个散射中心的参数。利用估计的参数重构 SAR 图像。在重构 SAR 图像的过程中, 采用的方法不同, 其效果也不尽相同。为了达到较好的可视化效果本文提出了一种新的可视化方法。

#### 3.1 属性散射中心参数估计

针对属性散射中心模型的参数估计问题, 研究人员提出了多种参数估计的方法<sup>[6-15]</sup>。本文简要介绍了经典的极大似然方法<sup>[1]</sup>。

SAR 观测数据是雷达在特定俯仰角下的观测数据, 散射中心的参数估计问题可以写成如下形式( $\boldsymbol{\theta}$ 表示散射中心的3维电磁散射模型的2维投影参数):

$$\underbrace{D(f, \phi)}_{\text{观测项}} = \underbrace{E(f, \phi; \boldsymbol{\theta})}_{\text{模型项}} + \underbrace{N(f, \phi)}_{\text{噪声}} \quad (2)$$

$D(f, \phi)$  是已知的 SAR 图像的频域数据,  $E(f, \phi; \boldsymbol{\theta})$  是电磁散射模型数据,  $N(f, \phi)$  是噪声数据。

则参数  $\boldsymbol{\theta}$  的极大似然参数估计为:

$$\boldsymbol{\theta}_{\text{ML}} = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}} \|D - E(\boldsymbol{\theta})\|^2 \quad (3)$$

在高频区获得的 SAR 图像数据中, 散射中心是一个个独立的响应区域, 我们可以利用散射中心的独立性对估计问题做一个简化。

对于得到的 SAR 图像首先要分割出包含散射中心响应的图像区域; 然后估计该散射中心的电磁

散射模型参数; 接着消除已提取的散射中心区域, 并分割出下一个散射中心区域<sup>[5]</sup>。如图1所示。

此方法涉及五大问题<sup>[1]</sup>: (1) 图像分割(Image segmentation), 即分离出独立的散射中心的响应区域; (2) 模型定阶(Model order selection), 要分割出多少个散射中心算法结束; (3) 结构选择(Model structure selection), 属性散射中心模型分为局部式和分布式散射中心, 对于分割出的散射中心需要确定其类型; (4) 参数初值求解(Parameters initialization), 用数值优化算法求解模型参数, 需要提供参数的初值; (5) 参数优化(Parameters optimization), 根据参数初值对目标代价函数进行数值迭代, 以得到更精确的参数值。

#### 3.2 目标重构及可视化

**3.2.1 基于单个散射中心自适应成像的 SAR 目标重构** 对原始 SAR 数据进行参数估计进而可以重构 SAR 图像达到目标重构可视化增强的效果。本节中介绍了传统的重构方法和本文中提出重构方法的原理。

传统的重构方法首先根据目标单个散射中心的回波数据重构整体的回波数据<sup>[1,2,15]</sup>:

$$E_c(f, \phi; \boldsymbol{\theta}_c) = \sum_{i=1}^p E_{ci}(f, \phi; \boldsymbol{\theta}_{ci}) \quad (4)$$

其中

$$E_{ci}(f, \phi; \boldsymbol{\theta}_{ci}) = A_{ci} \cdot \left( j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_{ci}} \cdot \exp \left( \frac{-j4\pi f}{c} (x_{ci} \cos \phi + y_{ci} \sin \phi) \right) \cdot \text{sinc} \left( \frac{2\pi f}{c} L_{ci} \sin(\phi - \bar{\phi}_{ci}) \right) \cdot \exp(-2\pi f \gamma_{ci} \sin \phi) \quad (5)$$

其中  $\boldsymbol{\theta}_c^T = [\boldsymbol{\theta}_{c1}^T, \boldsymbol{\theta}_{c2}^T, \dots, \boldsymbol{\theta}_{cp}^T]$  为参数估计的结果,  $E_{ci}(f, \phi; \boldsymbol{\theta}_{ci})$  为单个散射中心重构的回波数据。再对

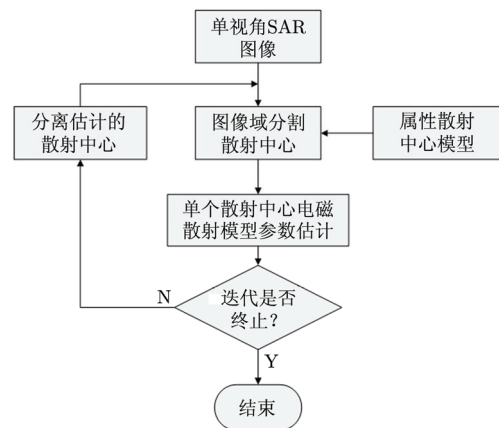


图1 本文采用的参数估计流程图

Fig. 1 Flowchart of parameter estimation

回波数据加窗处理再进行 IFFT 成像即可以得到重构的 SAR 目标图像<sup>[1,2,15]</sup>：

$$D_c(x, y) = \text{IFFT} \left( \text{Win}(f) * \sum_{i=1}^p E_{c_i}(f, \phi; \theta_{c_i}) \right) \quad (6)$$

其中  $D_c(x, y)$  为重构的 SAR 图像， $\text{Win}(f)$  为频域窗函数。传统的方法实际上遵循了数据→参数估计→参数生成数据→新数据非参数化成像的过程，这样的方式中，相干成像方法对于可视效果的影响依然存在。并且，传统的重构方法中的加窗操作并没有统筹考虑到每个散射中心的属性，这种全局的加窗方式很难做到好的适应性。因此，传统的 SAR 目标重构方法并没有充分发挥模型的优势。

由于 IFFT 操作的线性特性，整个 SAR 图像的重构可以等效为单个散射中心的单独成像并进行叠加的结果，即：

$$\begin{aligned} D_c(x, y) &= \text{IFFT} \left( \sum_{i=1}^p \text{Win}_{f_i}(f) * E_{c_i}(f, \phi; \theta_{c_i}) \right) \\ &= \sum_{i=1}^p \text{IFFT}(\text{Win}_{f_i}(f) * E_{c_i}(f, \phi; \theta_{c_i})) \\ &= \sum_{i=1}^p \text{Win}_{t_i}(t) * \text{IFFT}(E_{c_i}(f, \phi; \theta_{c_i})) \quad (7) \end{aligned}$$

其中  $\text{Win}_{f_i}(f)$  为频域的窗函数， $\text{Win}_{t_i}(t)$  为变换到图像域的窗函数。

与传统重构方法不同的是，在利用单个散射中心成像叠加的过程中，可以利用参数估计的先验信息，对单个散射中心采取自适应的成像策略。如式(7)所示，对于每个散射中心的重构回波  $E_{c_i}(f, \phi; \theta_{c_i})$  可以根据估计得到的该散射中心属性参数(强度、位置)采用最优的加窗方式  $\text{Win}_{f_i}(f)$ 。由于已知了单个散射中心的位置信息，本实验中采取图像域加矩形窗(对应于频域的 Sinc 窗)的方法保留主瓣，截除其旁瓣。相比于传统的重构方法，这种分离单个散射中心并且自适应成像的方法复杂度低并且可以很好地去除旁瓣、保持图像的分辨率，从而可以有效避免强散射中心对于弱散射中心的掩盖以及相邻散射中心难以区分的问题，达到目标重构的可视化增强。两种重构方法如图 2 所示。

**3.2.2 单个散射中心成像的门限选取** 在使用图像域的矩形窗去除旁瓣保持主瓣的过程中，门限的选取对于最终的可视化效果具有非常大的影响。过大的门限可能会导致展布式散射中心的退化，过小的门限可能导致临近散射中心无法得到有效区分。

(1) 对于局部式散射中心。局部式散射中心在图像上表现为距离向和方位向上的单一位置，对于理想点散射中心而言，其表现为 2 维 Sinc 函数。因此可根据 Sinc 函数的 3 dB 主瓣宽度选取门限。

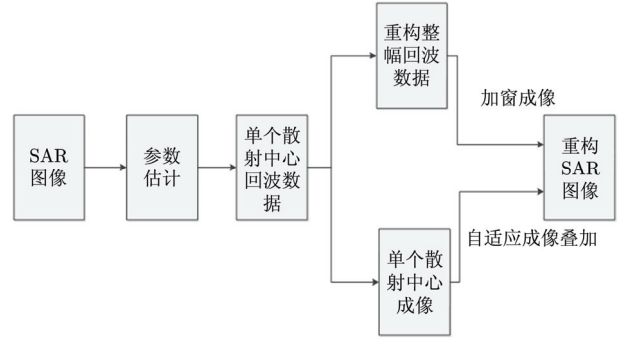


图 2 两种重构方法

Fig. 2 Two methods of reconstruction

(2) 对于展布式散射中心。由于随着倾角  $\phi$  的变大，展布式散射中心逐渐分离为两个尖峰，但在大多数相对倾角 ( $\phi_p < 0.8$ )，展布式散射中心的幅度保持在 3 dB 以内<sup>[1]</sup>。因此对于展布式散射中心可选取 3 dB 门限。

综上所述，单个散射中心可选取最大幅度的 -3 dB 作为截取门限。本文中通过门限的调整也证明了 3 dB 门限下可以实现较好的可视化效果。

## 4 实验结果

本节中采用两个临近点目标以及较为复杂的坦克目标的电磁计算数据进行验证实验。仿真参数为：中心频率  $f_c=9.0 \times 10^9$  Hz，带宽  $1.0 \times 10^9$  Hz，成像孔径  $5^\circ$ ，成像点数  $M_z = N_z = 101$ 。

### 4.1 邻近点散射目标试验

为测试提出的可视化增强方法对分辨能力的提升将邻近点散射中心的参数设定如表 1 所示。

表 1 点散射中心参数设定

Tab. 1 Parameters setting of point scattering center

散射中心	$A$	$\alpha$	$x_p$ (m)	$y_p$ (m)	$L_p$ (m)	$\phi_p$ (rad)	$\gamma_p$
S1	5	0.5	0	0	0	0	0
S2	5	0.5	0	0.15	0	0	0

参数估计的结果如表 2 所示。

表 2 点散射中心参数估计结果

Tab. 2 Parameters estimation of point scattering center

散射中心	$A$	$\alpha$	$x_p$ (m)	$y_p$ (m)	$L_p$ (m)	$\phi_p$ (rad)	$\gamma_p$
S1	4.96	0.5	0.0013	0.0015	0	0	0
S2	5.12	0.5	0.0021	0.1520	0	0	0

基于参数估计结果重构点目标如图 3(为便于观察截取了以点散射中心为中心的部分图像区域)。

为测试提出的可视化方法对强旁瓣掩盖弱散射中心的改善,邻近点散射中心的参数设定如表 3 所示。

表 3 点散射中心参数设定

Tab. 3 Parameters setting of point scattering center

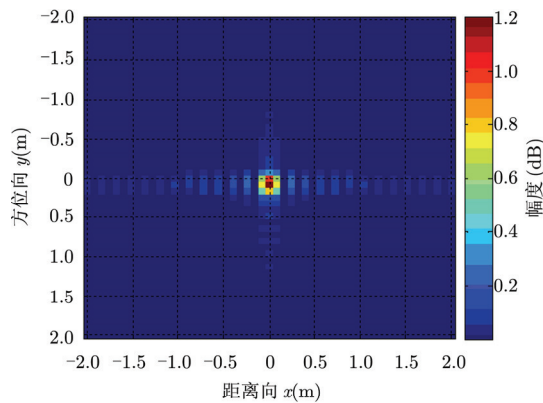
散射中心	$A$	$\alpha$	$x_p$ (m)	$y_p$ (m)	$L_p$ (m)	$\phi_p$ (rad)	$\gamma_p$
S1	5	0.5	0	0	0	0	0
S2	2	0.5	0	0.15	0	0	0

参数估计的结果如表 4 所示。

表 4 点散射中心参数估计结果

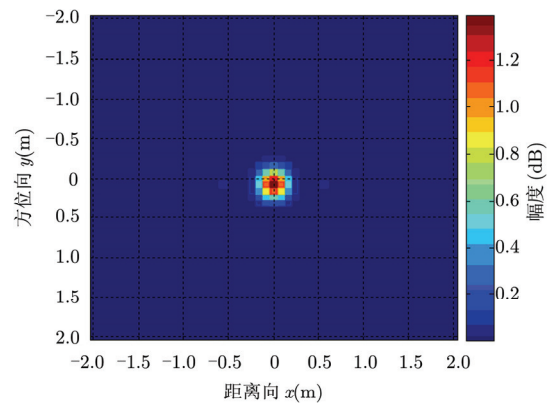
Tab. 4 Parameter estimation of point scattering center

散射中心	$A$	$\alpha$	$x_p$ (m)	$y_p$ (m)	$L_p$ (m)	$\phi_p$ (rad)	$\gamma_p$
S1	5.12	0.5	0.0015	0.0014	0	0	0
S2	2.21	0.5	0.0022	0.1590	0	0	0



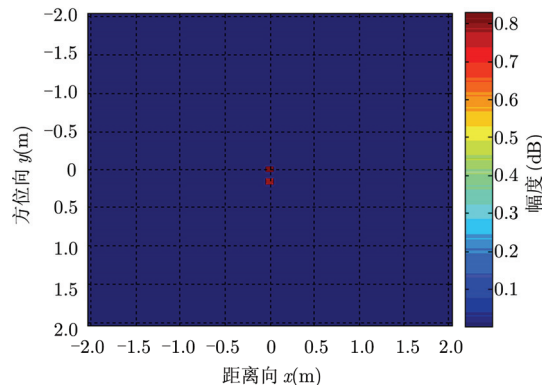
(a) 传统方法(不加窗)

(a) Reconstruction based on traditional method (without windowing)



(b) 传统方法(加-35 dB泰勒窗)

(b) Reconstruction based on traditional method (Adding Taylor window of -35 dB)



(c) 本文采用的方法

(c) Reconstruction based on proposed method

图 3 同强度点散射源的分辨能力实验结果

Fig. 3 The resolution test of two point scattering centers with same intensity

基于参数估计结果重构点目标如图 4(为便于观察截取了以点散射中心为中心的部分图像区域)。

邻近点散射中心实验结果表明,对比传统的目标重构方法,本文采用目标重构可视化增强方法可以有效区分邻近的散射中心并且可以避免强散射中心的旁瓣对于弱散射中心的掩盖,达到点目标重构可视化效果的增强。

## 4.2 坦克目标实验

坦克目标由包括二面角、三面角、顶帽等典型部件组成,这些部件的后向散射共同构成坦克目标的后向散射场。本节利用坦克目标(如图 5)可以很好地检验所提出的可视化方法对于复杂目标重构效果的改善。采用俯仰角  $20^\circ$  方位角  $45^\circ$  下的电磁计算数据进行参数估计得到的 15 个散射中心参数(见表 5)重构坦克图像。

由于坦克目标中存在多个散射中心且各个散射中心之间存在多种位置关系,因此在对各个散射中心成像过程中矩形窗门限的选取尤为重要,本文中

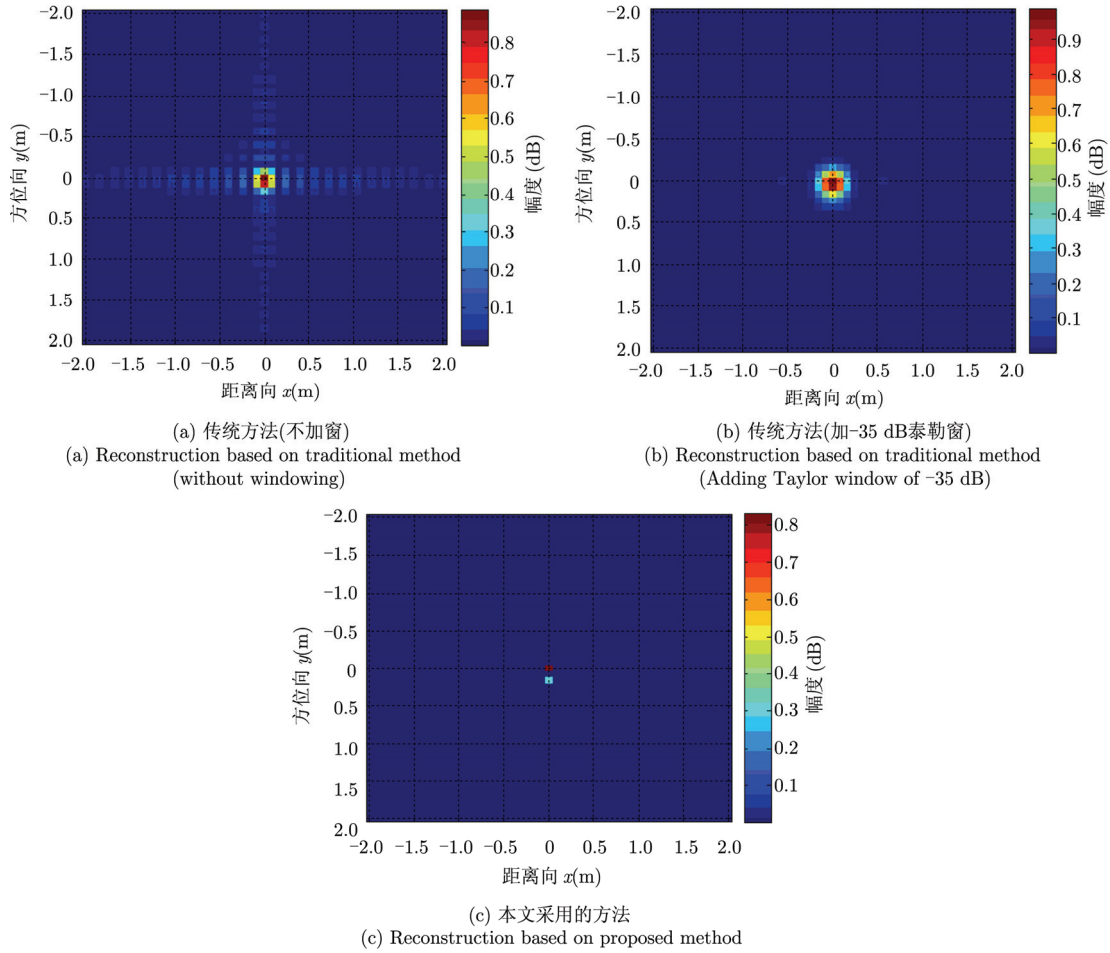


图4 强弱点散射源的实验结果

Fig. 4 The test of two point scattering centers with different intensity



图5 坦克目标CAD模型

Fig. 5 CAD model of tank

采取调整门限寻优的方法力图达到较好的重构效果如图6所示。

坦克目标重构实验中，采用本文提出的可视化重构方法，通过调整门限可知选取3 dB门限可以达到较好的重构效果。门限较小会导致部分临近散射中心无法区分，门限较大则会导致展布式散射中心长度变小。

坦克目标的实验结果表明，相比传统的目标重构方法，本文采用的目标重构可视化增强方法通过选取合适的门限可以有效区分相邻的散射中心并且可以体现出弱散射中心从而较好地重构坦克目标。

实验结果表明，该方法可以运用于复杂目标重构的可视化增强。

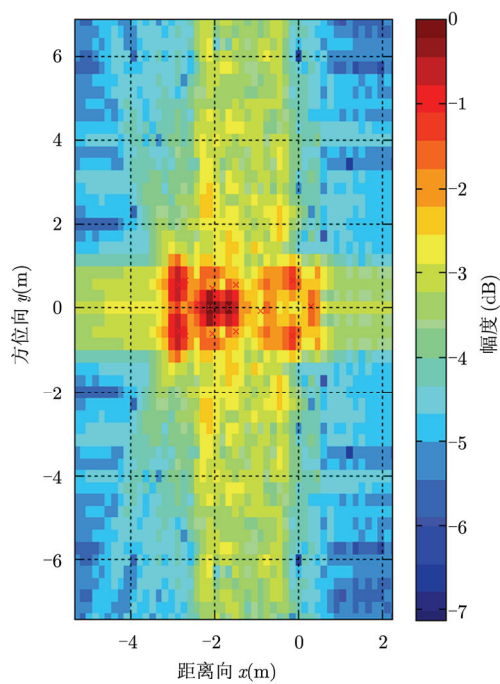
### 5 结论

本文针对传统的SAR目标重构方法中存在的分辨率下降以及强散射中心旁瓣掩盖弱散射中心的缺点，利用了成像过程的线性特征和参数估计的结果对每个散射中心自适应成像实现了保持主瓣截除旁瓣的目的从而达到了SAR目标重构可视化效果的增强。采用简单点散射实验以及复杂坦克目标的仿真实验验证算法的可行性和优越性。

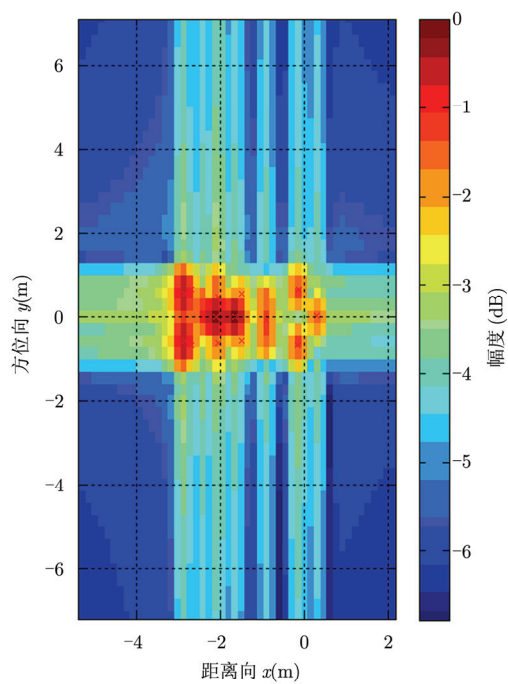
表5 坦克目标的参数估计结果

Tab. 5 The result of parameter estimation of tank target

散射中心	$A$	$\alpha$	$x_p$ (m)	$y_p$ (m)	$L_p$ (m)	$\phi_p$ (rad)	$\gamma_p$
S1	16.290	0.500	-2.090	-0.001	0	0.019	-2.0e-12
S2	12.025	0.500	-1.645	-0.001	0	0.038	-1.25e-9
S3	8.178	1.000	-2.847	0.552	0.855	0.008	0
S4	8.210	1.000	-2.846	-0.547	0.856	0.003	0
S5	2.298	1.000	-2.382	0.096	0.772	0.348	0
S6	1.015	1.000	-0.136	0.666	0.417	0.070	0
S7	0.930	0.500	-0.151	-0.672	0.420	0.045	1.9e-11
S8	2.047	1.000	-2.055	0.490	1.112	0.296	0
S9	1.291	1.000	-2.058	-0.602	1.015	0.305	0
S10	2.068	1.000	-0.911	-0.062	1.512	0.567	0
S11	0.646	1.000	0.296	0.023	0.572	0.275	0
S12	0.217	0.500	-1.502	0.566	0	0.013	1.01e-10
S13	0.217	0.500	-1.502	-0.566	0	0.013	2.31e-11
S14	0.325	1.000	-2.699	-0.672	0.510	0.022	0
S15	0.327	1.000	-2.699	0.672	0.509	0.023	0



(a) 原始SAR图像(加-35 dB泰勒窗)  
(a) Original SAR image (Adding Taylor window of -35 dB)



(b) 传统重构方法(加-35 dB泰勒窗)  
(b) Reconstruction based on traditional method (Adding Taylor window of -35 dB)

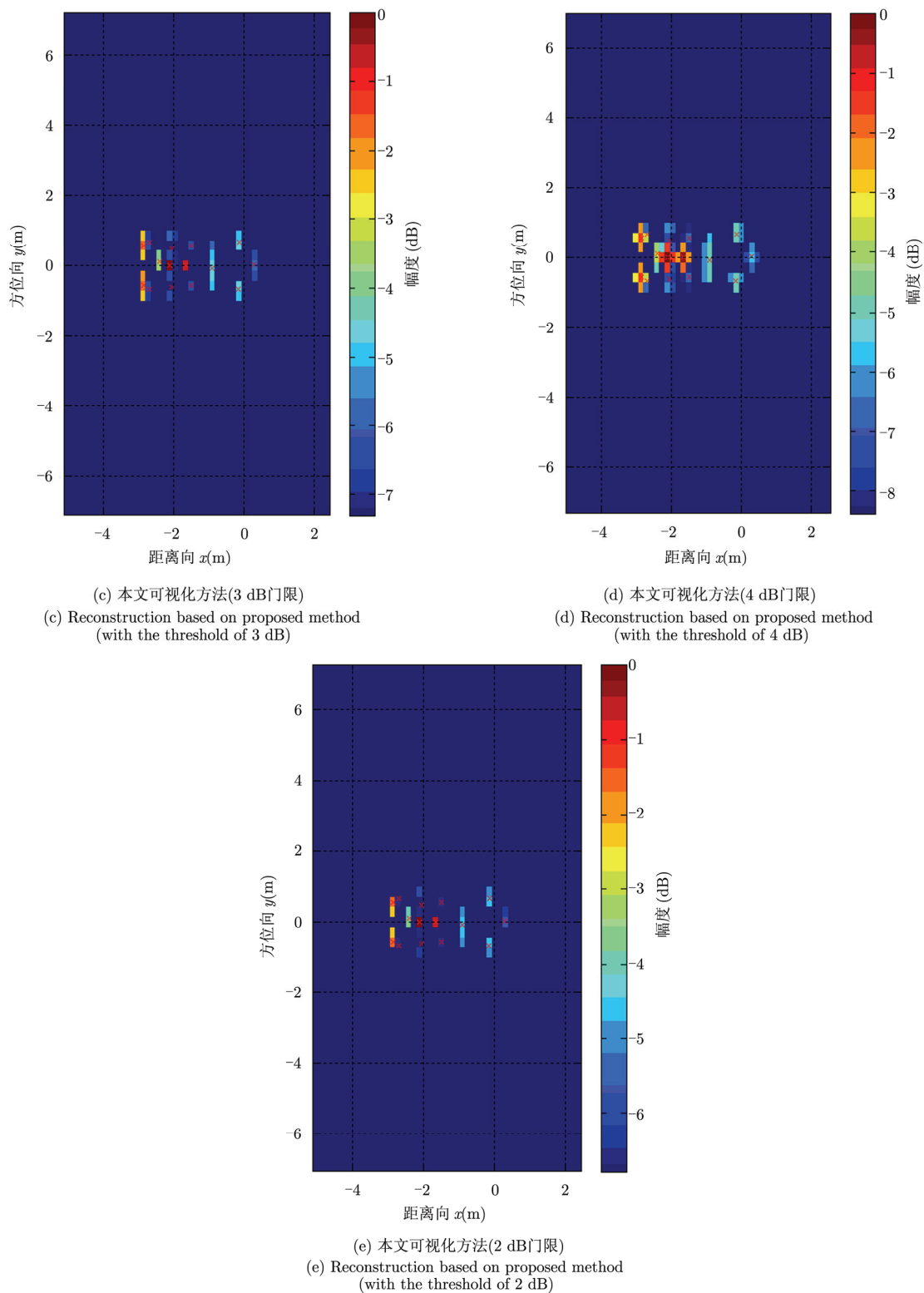


图6 基于估计参数重构SAR图像

Fig. 6 Reconstruction of SAR image based on parameter estimation

参考文献

[1] Michael A Koets and Randolph L Moses. Feature extraction using attributed scattering center models on SAR image[J]. *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery*, 1999, 59(4): 521-524.

[2] Wehner D R. High Resolution Radar (2nd Ed)[M]. Boston, MA: Artech House, 1995: 55-69.

[3] Potter L C and Moses R L. Attributed scattering centers for

- SAR ATR[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 5(1): 79-91.
- [4] Yeliz Akyildiz. Feature extraction from synthetic aperture radar imagery[D]. [Master dissertation], The Ohio State University, 2000.
- [5] 孙真真, 陈曾平, 庄钊文, 等. 一种高频区复杂雷达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. Sun Zhen-zhen, Chen Zeng-ping, Zhuang Zhao-wen, et al. A parametric model for high frequency complex 2-D radar scattering[J]. *Journal of National University of Defence Technology*, 2001, 23(4): 113-119.
- [6] Stoica P and Nehorai A. Music, maximum likelihood, and Cramer-Rao bound[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1989, 37(5): 720-741.
- [7] Hurst M P and Mittra R. Scattering center analysis via prony's method[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1987, 35(8): 986-988.
- [8] Sacchini J Steedly and Moses R L. Two-dimensional Prony modeling and parameter estimation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(11): 3127-3137.
- [9] Carriere R and Moses R L. High resolution radar target modeling using a modified prony estimator[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1992, 40(1): 13-18.
- [10] Steedly W M and Moses R L. High resolution exponential modeling of fully polarized radar returns[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 1991, 27(5): 459-469.
- [11] Potter L C, Chiang D M, and Carriere R. A GTD-based parametric model for radar scattering[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1995, 43(10): 1058-1068.
- [12] Tufts D W and Kumaresan R. Estimation of frequencies of multiple sinusoids: making linear prediction perform like maximum likelihood[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1982, 70(9): 975-989.
- [13] Gerry M J, Potter L C, and Gupta J. A parametric model for synthetic aperture radar measurements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1999, 47(7): 1179-1188.
- [14] Jonsson R, Genell A, and Losaus D. Scattering center parameter estimation using a polynomial model for the amplitude aspect dependence[J]. *SPIE, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery IX*, 2002, v01.4727: 46-57.
- [15] 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], 国防科学技术大学, 2003. Zhang Ai-bing. Attribute scattering center feature extraction of complex target from high resolution SAR imagery[D]. [Master dissertation], National University of Defense Technology, 2003.

### 作者简介



丁柏圆(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为自动目标识别。

钟金荣(1985-), 男, 博士研究生, 研究方向为自动目标识别。

马聪慧(1987-), 女, 博士研究生, 研究方向为自动目标识别。

文贡坚(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为精确制导与自动目标识别。