

# 一种基于时频分解的 ISAR 图像理解与处理方法<sup>1</sup>

孙真真 陈曾平\* 庄钊文\* 郭桂蓉\*

(北京系统工程研究所 北京 100101)

\*(国防科技大学自动目标识别重点实验室 长沙 410073)

**摘 要** 逆合成孔径雷达 (ISAR) 图像的自动理解是应用其进行自动目标识别 (ATR) 的基础。文中提出一种基于改进的自适应高斯表示 (AGR) 的 ISAR 图像理解与处理方法。该方法对目标 ISAR 图像中点散射与非点散射效应并存的现象给以有效的参数化的描述, 进而消除非点散射在图像中造成的模糊展布, 并提取到可用于目标识别的成像目标散射中心特征。基于飞机目标实测数据的实验验证了该方法的有效性。

**关键词** 逆合成孔径雷达, 时频分析, 散射中心

**中图分类号** TN958, TN911.73

## 1 引 言

在高频区, 雷达目标的电磁散射可以用一组散射中心来近似<sup>[1]</sup>。逆合成孔径雷达 (ISAR) 成像处理基于点散射中心模型<sup>[2]</sup>, 即认为散射中心的位置及其强度不随方位角和入射波频率的变化而改变。然而, 复杂目标上并存有不同类型的散射中心, 其中非点散射中心的散射显示出对入射波频率或观测角不可忽略的依赖关系<sup>[3]</sup>, 此时仍用基于点散射模型的成像方法, 将导致这种散射点的“像”被模糊展布, 而影响图像质量。

针对上述复杂目标 ISAR 图像的特点, 本文提出基于改进的自适应高斯表示 (AGR) 时频分解的 ISAR 图像理解和处理方法, 对图像中的理想点散射中心与非点散射中心给以物理意义明确的参数化描述, 进而可自动地将两者区分开来, 消除 ISAR 图像中的模糊展布效应 (亦即 ISAR 图像的增强), 同时, 提取成像目标散射中心的特征。

## 2 AGR 时频分解的基本原理和实现算法

### 2.1 AGR 时频分解的基本原理

AGR 是用高斯函数作为基函数来表示信号的一种时频分解方法。它将信号  $s(t)$  用基函数  $h(t)$  展开:

$$s(t) = \sum_{p=1}^{\infty} B_p h_p(t) \quad (1)$$

其中  $h(t)$  是规范化的高斯函数:

$$\begin{aligned} h_p(t) &= g_p(t - t_p) \exp\{j2\pi f_p t\} \\ g_p(t) &= (\pi\sigma_p^2)^{-0.25} \exp\{-t^2/2\sigma_p^2\} \end{aligned} \quad (2)$$

上式的高斯基函数具有可调整的标准方差  $\sigma_p$  和时频中心  $\{t_p, f_p\}$ 。其中  $\sigma_p$  反映基函数在时频域的形状特征,  $\sigma_p$  增大时, 基函数沿时间轴展宽, 沿频率轴收缩。由于这些可在时间、频率轴

<sup>1</sup> 2001-03-19 收到, 2002-08-20 改回

上移动的高斯函数并非一组正交基, 因而其展开系数  $B_p$  不是唯一的, 需通过以下的循环程序优化选取:

$$|B_p|^2 = \max_{\sigma_p, t_p, f_p} \left| \int s_{p-1}(t) h_p^*(t) dt \right|^2, \quad p = 1, 2, \dots, P \quad (3)$$

其中  $s_0(t) = s(t)$ 。当  $p > 1$  时,  $s_p(t)$  是将  $s_{p-1}(t)$  正交投影到  $h_p(t)$  上后的剩余量:

$$s_p(t) = s_{p-1}(t) - B_p(t) h_p(t) \quad (4)$$

上述过程循环进行, 直至重建信号与原信号间的误差  $\|s_p\|^2$  随着循环次数  $p$  (亦即分解所得分量的数目) 减小到设定的逼近误差门限值  $\varepsilon$ , 此时循环总次数为  $P$ , 原信号的 AGR 分解完成。

### 2.2 AGR 最优分解实现算法

AGR 方法中最为困难的莫过于 (3) 式中定义的最优基函数  $h_p(t)$ 。实质上, 这是一个多极值最优化问题, 文献 [4] 采用了一种数值优化算法。

对于一给定的  $\sigma_p$ , 通过在时-频域上的二维搜索, 获得当前信号在高斯基上投影的最大值, 即

$$|B_p(\sigma_p)|^2 = \max_{t_p, f_p} \left| \int s_{p-1}(t) h_p^*(t; t_p, f_p, \sigma_p) dt \right|^2 \quad (5)$$

在求解上式时, 时域上采用步长逐级细化的滑动移位搜索。搜索过程从一个较大的标准方差初始估值  $\sigma_{p,I}$  开始, 标准方差候选估值  $\sigma_{p,n}$  随搜索级数  $n$  逐级递减, 搜索步长  $\delta_{p,n}$  正比于  $\sigma_{p,n}$ , 随  $n$  逐级细化, 这意味着第  $n+1$  级搜索是较前一级精度更高的峰值搜索过程。

$\sigma_p$  的最佳估计值为

$$\hat{\sigma}_p \arg \max_n |B_p(\sigma_{p,n})|^2 \quad (6)$$

对频率中心  $f_p$  的估计, 是在上述时域滑动移位搜索确定了标准方差及时间中心的估值  $\hat{\sigma}_p$ ,  $\hat{t}_p$  后, 经 FFT, 在频域上一次搜索完成, 即

$$\hat{f}_p = \arg \max[\mathcal{F}\{s_{p-1}(t)g(t - \hat{t}_p; \hat{\sigma}_p)\}(f)] \quad (7)$$

## 3 AGR 时频分解方法的算法改进

### 3.1 可变缩率 (VM, Variable Minification) AGR 分解实现算法

上述移位搜索算法的关键问题之一是: 搜索步长采用何种由粗到精的方式, 即如何选取标准方差初始估值  $\sigma_{p,I}$  和逐级细化  $\sigma_{p,n}$  的规则, 这直接决定了算法的精度与计算速度。该问题的实质是: 从标准方差  $\sigma_p$  的实际未知解存在区域内, 依某一逐级细化规则选取有限个近似解  $\sigma_{p,n}$  组成标准方差候选解空间, 使在此空间上进行的逐级搜索过程能较快地收敛, 获得 AGR 分解的第  $p$  个分量的最佳参数估值  $\hat{t}_p$  和  $\hat{\sigma}_p$ 。

文献 [4] 采用了对标准方差逐级减半取值, 即多分辨基函数的标准方差缩率  $d = 2$ , 这意味着  $\sigma_p$  的候选解为:  $\{\sigma_{p,I}, \sigma_{p,I/2}, \sigma_{p,I/4}, \dots, \sigma_{p,I/2^N}\}$ 。该方法的优点是收敛速度较快, 但另一方面, 该候选解空间的组成使得标准方差估值  $\hat{\sigma}_p$  的最大可能误差达到

$$e_{\max}(\sigma_p) = \sigma_{p,I} \cdot (1 - 1/d)/2 = \sigma_{p,I}/4 \quad (8)$$

且当标准方差真值  $\sigma_p = 3\sigma_{p,I}/4$  时发生, 显然, 这对缓变分量 (大方差) 的刻划尤其不利。

若为了减小误差  $e_{\max}$ , 改用较小的标准方差缩率, 又会随之产生搜索过程收敛速度慢, 计算量增加的矛盾。图 1 绘出了给定总搜索级数  $N$  下, 标准方差  $\sigma_{p,n}$  随级数  $n$  递减的曲线  $\sigma_{p,n}(n)$ 。  $d = 2$  时, 曲线具有最陡峭的形状, 在前段迅速下降, 造成大标准方差下的取值过于粗糙, 这意味着缓变分量的参数估计准确度难以保证; 随着  $d$  值的减小, 上述状况有所改善, 但在相同级数  $N$  下, 曲线无法收敛至足够小的标准方差值 (见图 1 中  $d = 1.15$  对应的曲线), 从而丧失对突变分量的精确刻划能力。

为了解决上述矛盾, 本文提出分段的 VM 优化算法。其基本思想是: 在低搜索级数下使用较小的缩率, 提高缓变分量的参数估计准确度。而在高搜索级数段则使用较大的缩率, 以加快搜索速度, 用相对较小的计算量达到搜索精度要求。换言之, 相对于原恒定缩率 (CM, Constant Minification) 算法, 这里的标准方差缩率是以搜索级数  $n$  为变量的分段函数。即

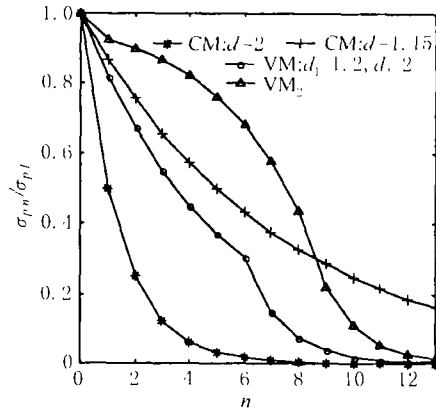


图 1 不同 CM 下, 以及 VM 下, 标准方差候选值  $\sigma_{p,n}$  随搜索级数下降的曲线

$$\sigma_{p,n}(n) = \begin{cases} \sigma_{p,I}, & n = 0, \\ \sigma_{p,n-1}/d_1, & n = 1, 2, \dots, N_c, \quad d_1 < d_2 \\ \sigma_{p,n-1}/d_2, & n = N_c + 1, \dots, N \end{cases} \quad (9)$$

前后两种缩率取值  $d_1$  和  $d_2$ , 及其跳变点  $N_c$ , 可根据实际信号和具体要求选取。例如, 在高搜索级数段取  $d_2 = 2$ , 同时希望  $e_{\max} \leq \sigma_{p,I}/12$ , 则由 (8) 式可取  $d_1 = 1.2$ , 对应的曲线  $\sigma_{p,n}(n)$  如图 1 中加 “o” 标记的实线所示。

根据需要, 缩率还有其它可行的取法, 例如:

$$\sigma_{p,n} = \begin{cases} \sigma_{p,I}, & n = 0 \\ \frac{1 - (3/4)^{N_c - n}}{1 - (3/4)^{N_c - n + 1}} \sigma_{p,n-1} = [1 - (3/4)^{N_c - n}] \sigma_{p,I}, & n = 1, 2, \dots, N_c - 1 \\ \sigma_{p,n-1}/2, & n = N_c, N_c + 1, \dots, N \end{cases} \quad (10)$$

在  $N$  一定的情况下, 取较大的  $N_c$ , 有助于缓变分量的估计; 反之, 则利于突变分量的估计。其对应的曲线如图 1 中 VM<sub>2</sub> 所示, 该方法形成两端相对平缓, 而中间段下降相对较快的曲线形状, 这一特点更适于区分和准确估计典型的突变和缓变分量, 与提取点散射和非点散射特征的应用相吻合。

### 3.2 标准方差估值 $\hat{\sigma}_p$ 的频域反馈修正方法

研究发现, 由于时域搜索过程中标准方差候选解  $\sigma_{p,n}$  取值不当, 而造成的  $\hat{\sigma}_p$  的相对估计误差, 比由此产生的  $\hat{t}_p$  的相对估计误差要大, 因此, 提出  $\hat{\sigma}_p$  频域反馈修正法: 在频率中心  $f_p$

的估计过程中, 不改变时域滑动移位搜索得到的时间中心的估值  $\hat{t}_p$ , 而  $\hat{\sigma}_p$  进行进一步的反馈修正, 以减小 AGR 分解的整体误差。具体步骤如下:

(1) 经过时域滑动移位搜索已得到第  $p$  个分量的部分参数估计值  $\hat{t}_p$ ,  $\hat{B}_p$  和  $\hat{\sigma}_p$ , 设对标准方差  $\hat{\sigma}_p$  进行修正的累计循环次数  $m = 1$ 。

(2) 取  $\hat{\sigma}_p$  的修正值候选空间:

$$\Theta = \{\hat{\sigma}_p(1 + 1/3^m), \hat{\sigma}_p, \hat{\sigma}_p(1 - 1/3^m)\} \quad (11)$$

即修正值是在原标准方差估值  $\hat{\sigma}_p$  及其两个邻近值间选取的。

(3) 在时间中心估值  $\hat{t}_p$  和标准方差修正值  $\hat{\sigma}'_p$  下, 进行频域搜索:

$$\hat{f}_p = (\hat{\sigma}'_p) = \arg \max_f [\mathcal{F}\{s_{p-1}(t)g(t - \hat{t}_p; \hat{\sigma}'_p)\}(f)], \quad \hat{\sigma}'_p \in \Theta \quad (12)$$

(4) 以频域搜索 (12) 式取得最大值时对应的标准方差修正值  $\hat{\sigma}'_p$ , 替代原标准方差估值  $\hat{\sigma}_p$ , 完成一次修正过程, 即

$$\hat{\sigma}_p = \arg \max_{\Theta} [\hat{f}_p(\hat{\sigma}'_p)] \quad (13)$$

(5) 令累计循环次数  $m = m + 1$ , 重复步骤 (2), (3), (4), 直至  $m$  达到设定的总循环次数  $M$ , 得到修正后的  $\hat{\sigma}_p$ , 同时得到频率中心估计值  $\hat{f}_p = \hat{f}_p(\hat{\sigma}_p)$ 。

上述的标准方差频域反馈修正法, 在采用最优算法不现实的情况下, 可将其作为一种能显著提高参数估计准确度的准最优方法。

## 4 ISAR 图像的 AGR 处理方法研究及实验

### 4.1 ISAR 图像 AGR 处理的系统架构

用 AGR 方法处理 ISAR 图像有两种方式, 分别对应不同的物理意义, 如图 2 的系统框图所示, 具体阐述如下:

**方式 1** ISAR 图像的径向 AGR 分解: 即对整幅 ISAR 图像的径向线逐条进行 AGR 分解。经上述处理, 原来标准的二维 (横向距离-径向距离,  $x$ - $y$ ) ISAR 图像又增加了一维频率向  $f$ , 形成一个  $x$ - $y$ - $f$  三维的矩阵, 矩阵中每一个  $x$ - $y$  二维切面, 实质上代表某一特定频率上的 ISAR 图像, 将其称之为时频 ISAR 图像。这种方式下, AGR 分解中标准方差  $\sigma_p$  的大小反映第  $p$  个分量对频率变化依赖性的强弱:  $\sigma_p$  小, 表明第  $p$  个分量在径向距离上 (时域) 是一个窄脉冲, 对应点散射中心。相应地,  $\sigma_p$  大, 说明该分量是对频率变化有较强依赖性的非点散射中心。

**方式 2** ISAR 图像的横向 AGR 分解: 即对整幅 ISAR 图像的横向线逐条进行 AGR 分解。依据 ISAR 成像原理, 横向距离分辨率来自方位角随成像观测时间的变化积累。因而, 这种方式下的  $\sigma_p$  值是反映第  $p$  个分量对方位角变化敏感程度的数量指标。

若对上述两种方式下 AGR 分解所得的分量, 去除其中具有较大  $\sigma$  值的分量, 即等效于清除散射性状随入射波频率或方位角变化的非点散射成分, 而由剩余分量重构的 ISAR 图像将是一幅消除了横向或径向模糊展布的“洁净”图像, 因此, AGR 时频分解提供了一种提高 ISAR 图像质量的途径。

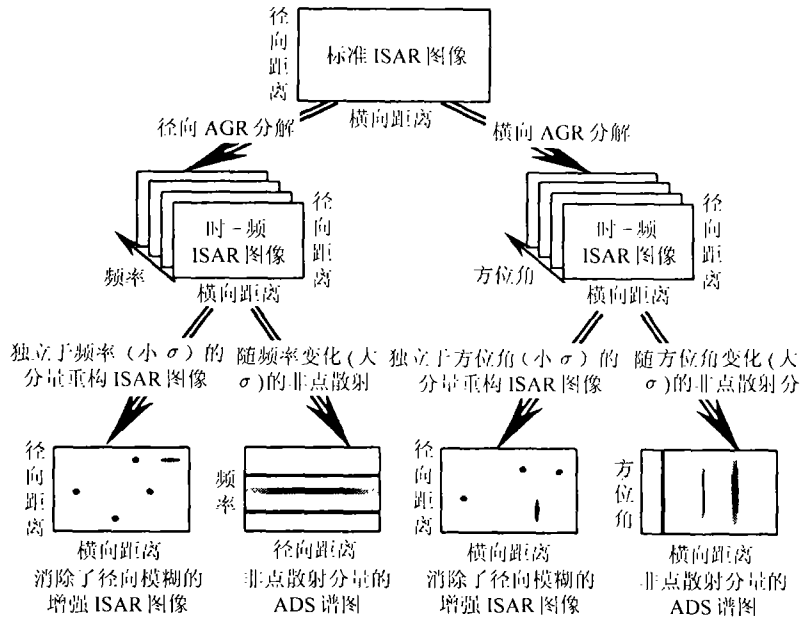


图 2 ISAR 图像的 AGR 时频分析处理系统框图

同时, 基于 AGR 分解结果, 可以构画所谓自适应谱图 (简记为 ADS), 它描述信号在联合时频域的能量分布<sup>[4]</sup>, 其定义为

$$\text{ADS}(t, f) = 2 \sum_{p=0}^{\infty} |B_p|^2 \exp\left\{-\frac{(t - t_p)^2}{\sigma_p^2} - (2\pi)^2 \sigma_p^2 (f - f_p)^2\right\} \quad (14)$$

通过对分离出的非点散射成分的 ADS 谱图的进一步分析, 还可以提取与之对应的非点散射结构的特征, 如谐振频率等。

#### 4.2 飞机目标 ISAR 图像的 AGR 处理实例研究

图 3 所示是波音 727 型喷气客机的 ISAR 图像, 它是用阶梯变频雷达, 在中心频率 9GHz, 带宽 150MHz 下的实测数据成像得到的。可以看到, 在飞机图像的尾部区域, 存在较为明显的横向条状展布, 且其位置已超出飞机的实际尺寸范围。

##### 4.2.1 飞机目标 ISAR 图像的 AGR 分解及重构

对此 ISAR 图像作横向 AGR 分解, 这里, 选取逼近误差门限  $\varepsilon = 0.05$ 。重构图像如图 4。该重构图像在忠实再现飞机目标的同时, 背景噪声也较原图像有所降低。由于以 AGR 分解得到的多组参数值可以很好地恢复原图像逐像素的数据, 这意味着图像数据量的大幅度压缩。

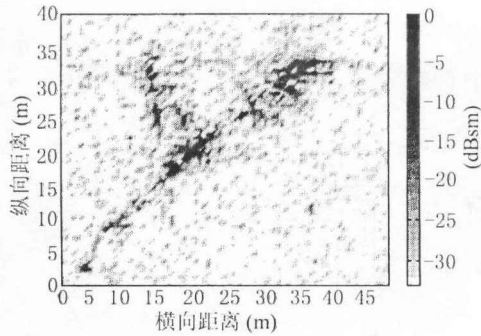


图3 波音 727 喷气式客机的 ISAR 图像

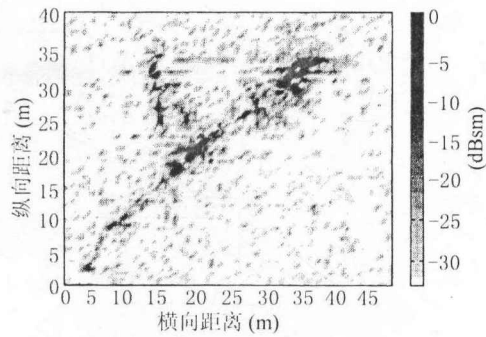


图4 波音 727 喷气式客机的 AGR 重构 ISAR 图像

4.2.2 飞机目标 ISAR 图像的 AGR 增强处理 图 5 是去除了  $\sigma \geq T/50$  ( $T$  为总观测时间) 的 AGR 分量后重构的 ISAR 图像, 比照图 3 与图 5, 尤其是飞机图像的尾部区域, 可见, 后者是一幅消除了横向模糊展布的“洁净”图像。

4.2.3 基于 AGR 的二维点散射中心特征提取 目标的强散射点信息是自动目标识别的重要分类特征。但若简单地通过幅值截取来提取强散射点集, 则会丧失某些能反映目标结构特性而散射强度却相对较小的关键点。如图 6 所示, 经幅值截取后, 图中机翼的前后缘、尖端及头部对应的散射点由于强度远不及飞机尾部排气管产生的强散射而被忽略。

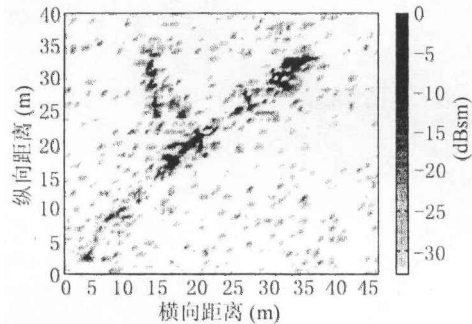


图5 波音 727 客机的 AGR 增强处理 ISAR 图像

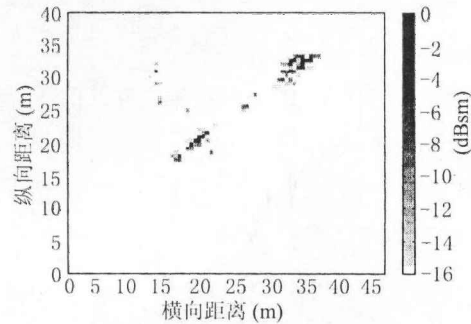


图6 经幅值截取的强散射点 ISAR 图像

而利用“1”中横向 AGR 分解的结果, 可以进行更为合理的点散射中心提取。适当设置标准方差门限  $\sigma_{th}$ , 满足  $\sigma \leq \sigma_{th}$  的小标准方差分量即为所要提取的点散射中心成分。图 7 为  $\sigma_{th}$  提取得到的点散射中心图像。易见, 反映飞机结构的关键点, 如机头、机翼尖端和机尾, 均有点散射中心的对应分布, 尤其是在原 ISAR 图像中几乎被淹没的飞机下侧机翼尖端对应的弱点散射, 也通过一个点散射中心被揭示出来。可见, 基于 AGR 分解提取得到的点散射中心集合可使目标的结构特征得以有效体现。

4.2.4 基于 ISAR 图像 AGR 处理的飞机目标散射特性时频分析 选取出能量较大的强点散射中心 (对应分量  $\sigma \leq T/130$ ) 和非点散射成分 ( $\sigma \geq T/30$ ), 图 8 和图 9 分别为两者的 ADS 谱图 (纵轴表示观测时间), 易见, 强点散射主要集中在成像测量时间的前期, 而非点散射则大都在后期产生。为验证上述分析, 分别仅利用成像测量时间的前段 ( $0 \leq t \leq 2/3T$ ) 和后段 ( $1/3T \leq t \leq T$ ) 的回波进行 ISAR 成像, 分别得到图 10 和图 11。在相同的分辨率下, 前者基本没有横向条纹, 具有较后者更好的图像质量。

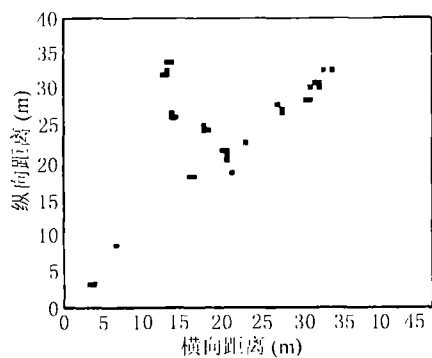


图 7 基于 AGR 分解而提取的点散射中心图像

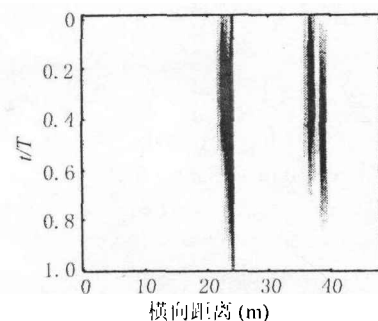


图 8 强点散射中心的 ADS 谱图

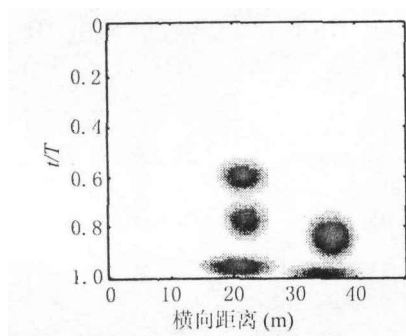


图 9 主要的非点散射成分的 ADS 谱图

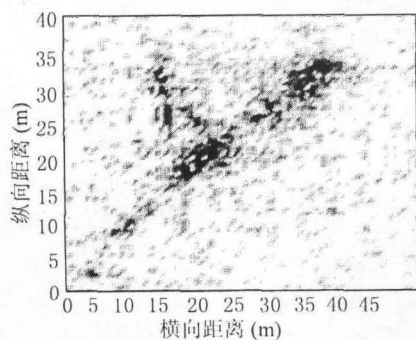


图 10 前段测量时间的回波所成 ISAR 图像

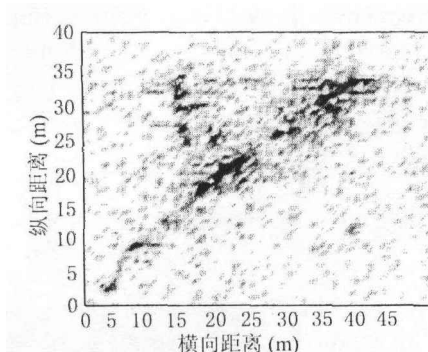


图 11 后段测量时间的回波所成 ISAR 图像

### 5 结 论

本文提出了一种基于改进的 AGR 时频分解的 ISAR 图像理解和处理方法。为了提高计算效率, 对原 AGR 算法作了改进, 并将改进的 AGR 方法应用于雷达目标 ISAR 图像的事后处理与分析, 完成了对飞机目标实测数据所成 ISAR 图像有效的增强处理, 提取到了反映成像目标

结构特征的点散射中心集合。结果表明基于 AGR 方法的 ISAR 图像理解、处理及目标散射特性的提取更为自动化,且物理意义明确。

### 参 考 文 献

- [1] J. B. Keller, Geometrical theory of diffraction, J. Opt. Soc. Am., 1962, 52(9), 116-130.
- [2] D. R. Wehner, High Resolution Radar, London, Artech House, 1995, Chap7.
- [3] A. W. Rihaczek, S. J. Heershkowitz, Man-made target backscattering behavior: Applicability of conventional radar resolution theory, IEEE Trans. on AES., 1996, 32(4), 809-824.
- [4] S. Qian, D. Chen, Signal representation using adaptive normalized Guassian functions, Signal Processing, 1994, 36(1), 1-11.
- [5] A. Moghaddar, E. K. Walton, Time-frequency distribution analysis of scattering from waveguide cavities, IEEE Trans. on AP, 1993, 41(5), 677-680.

## A METHOD OF UNDERSTANDING AND PROCESSING ISAR IMAGE BASED ON TIME-FREQUENCY ANALYSIS

Sun Zhenzhen    Chen Zengping\*    Zhuang Zhaowen\*    Guo Guirong\*

(Beijing Institute of System Engineering, Beijing 100101, China)

\*(ATR Lab. of National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** The basic and major difficulty in Automatic Target Recognition(ATR) based on the Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) image is to automatically understand the ISAR images. A method of understanding and processing ISAR image is presented, which is based on the time-frequency analysis algorithm — improved Adaptive Guassian Representation(AGR). By parameterizing the point-scattering and dispersive-scattering mechanisms existing in the target ISAR image, the dispersive-scattering effect is removed to improve the image quality, and extract features of scattering centers on the target which is useful to ATR. The efficiency and feasibility of the method is confirmed by the test based on the real data of airplane.

**Key words** Inverse Synthetic Aperture Radar(ISAR), Time-frequency analysis, Scattering center

- 孙真真: 女, 1973 年生, 博士, 研究方向为信号处理、雷达目标特征提取和自动识别等。  
 陈曾平: 男, 1967 年生, 教授, 目前主要从事信号处理、雷达目标识别及专用处理系统、可靠性工程等领域的研究。  
 庄钊文: 男, 1958 年生, 教授, 目前主要从事信号处理、雷达目标识别、模糊信息处理及可靠性工程等领域的研究。  
 郭桂蓉: 男, 1937 年生, 教授, 中国工程院院士, 目前主要从事信号处理、雷达目标识别、统计信息处理及模糊信息处理等领域的研究。