

文章编号 :1001-2486(2000)06-0078-05

一种自适应的 ISAR 图像时 - 频分析方法*

孙真真,叶伟,陈曾平,庄钊文

(国防科技大学自动目标识别重点实验室,湖南长沙 410073)

摘要 提出一种自适应的逆合成孔径雷达(ISAR)图像的时频分析方法,它将时频信号分解算法—自适应高斯基表示(AGR)方法与 ISAR 图像处理相结合。得益于高斯基函数方差的自适应调整,可自动地将图像中的理想点散射中心与非点散射结构区分开来。分别对 ISAR 图像的径向与横向距离轴进行上述变换,可解构成非点散射中心随角度或随频率变化的特性。应用该方法对仿真数据及飞机目标实测数据所成的 ISAR 图像进行时 - 频分析,结果表明该方法正确可行,且物理意义明确。

关键词 逆合成孔径雷达图像;时 - 频分析;散射中心

中图分类号:TN957.51 文献标识码:A

An Adaptive Method of ISAR Image Time-Frequency Analysis

SUN Zhen-zhen, YE Wei, CHEN Zeng-ping, ZHUANG Zhao-wen

(ATR Lab. of National Univ. of Defence Technology, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract A new adaptive time-frequency Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) image analytical method is presented, which combines the ISAR processing with the time-frequency analysis algorithm-Adaptive Gaussian Representation (AGR). This technique uses Gaussian basis function to adaptively parameterize the data. And as a consequence, the point-scattering and dispersive-scattering mechanisms can be readily separated based on the width of the Gaussian bases. Applying this transformation to range and crossrange axis of ISAR image can extract the frequency-dependent and the aspect-dependent features of nonpoint-scattering centers respectively. The method is tested by using simulation data and real data. The results show that it is a robust tool to post-process ISAR image. And it can provide additional information about the pointlike and dispersive scattering mechanisms that can be useful for ATR.

Key words Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) image; time-frequency analysis; scattering center.

目前 ISAR 成像的研究都是基于点散射中心模型,认为在小的观测角范围内,散射点的位置和强度都是不变的^[1]。而实际雷达目标的散射特性是十分复杂的,还会产生不符合上述理想模型的散射现象,如谐振、多次反射、爬行波等。这些展布式的非点散射在 ISAR 图像中表现为模糊的“云彩”,且往往与其在目标上真实的空间位置不相匹配,是影响成像质量的主要因素之一。另一方面,上述散射机制又包含着丰富的目标结构特性信息,若能被正确地提取和解释,将是自动目标识别的重要分类特征。

本文从雷达目标的电磁散射机理出发,将一种新的时 - 频信号分解算法——自适应高斯基表示(AGR)方法与 ISAR 图像分析处理相结合,在不同的变换域反映各种散射现象随时间(角度)和频率的变化,提取理想点散射中心以及对频率或角度变化敏感的展布式非点散射结构的特征。

在介绍自适应高斯基(AGR)方法之前,首先对 ISAR 图像中的非点散射效应给予描述分析,这种现象的存在是选用 AGR 方法对 ISAR 图像进行事后分析处理的原因。

1 ISAR 图像中的非点散射效应

ISAR 信号处理,实质上是确定目标上散射中心的位置和强度的过程,这些散射中心通常被假设为理想的点散射中心,即其位置及散射强度不随方位角和频率的变化而改变。实际上,上述模型只是一种近似^[3],目标散射中还包含对方位角或频率变化具有敏感性的展布式非点散射结构。例如,光滑延伸曲面产生的镜面反射,由于其等效散射中心是其表面法线指向雷达方向的那些散射点,因而对入射角的变

* 收稿日期:2000-08-06
作者简介:孙真真(1972-),女,博士生。

化十分敏感,其等效散射中心的位置会随观测角变化而发生漂移,散射强度也有所改变,而这些是无法通过对目标整体运动的补偿加以消除的,将导致 ISAR 图像中横向距离上该散射点的“像”被大大地展宽。而一些复杂的散射结构,如不规则腔体的散射,是多种散射方式的组合,对方位角和频率的变化同时具有很强的依赖性,这样的等效散射中心在 ISAR 图像中会产生展布于横向和径向的模糊的“云彩”,且往往与其在目标上真实的空间位置不相匹配。

图 1 示出了三个不同类型的散射中心的仿真 ISAR 图像。其中 a 是理想的点散射中心, b 是随频率衰减振荡的等效散射中心,只对频率变化敏感,其散射信号表达式为:

$$S(f, \theta) = A \frac{\exp[j2\pi kx \cos\theta + j2\pi yk \sin\theta]}{\alpha + j2\pi(f - f_0)} \quad (1)$$

式中 θ 是方位角, k 为波数,即 $k = 2\pi f/c$, α 为振荡衰减系数, f_0 是谐振频率之一。

c 是具有某种复杂展布式非点散射结构的散射中心,对方位角和频率变化都有依赖性。作为一种示意,这里取其相位的非线性变化形式为^[3]:

$$S(f, \theta) = S(f, t) = A \exp\{j2\pi B[(f/B)(1 + t/T)]\} \quad (2)$$

式中 B 为信号带宽, $-B/2 \leq f \leq B/2$; T 为总观测时间, $-T/2 \leq t \leq T/2$ 。由于方位角 $\theta(t)$ 是观测时间 t 的函数,这里回波信号以 t 为变量, β 为控制展布程度的参量。正如理论分析所预期,散射中心 b 由于谐振现象造成了径向距离上的延伸,而散射中心 c 则带来横向距离与径向距离上的成片模糊。

针对上述复杂目标的 ISAR 图像中点散射与非点散射效应并存的现象,需要寻求一种时-频分析方法,能自动地判别目标 ISAR 图像中的点散射中心与非点散射结构,为进一步对后者局部特性的分析提供切入点和基本参数。运用自适应高斯基表示(AGR)方法对 ISAR 图像进行处理,正是基于上述要求。

2 自适应高斯基表示(AGR)方法

2.1 自适应高斯基表示(AGR)方法的原理及实现算法

自适应高斯基表示(AGR)是用自适应高斯函数作为基函数来表示时-频信号的一种方法。即将信号 $s(t)$ 用基函数 $h(t)$ 展开:

$$s(t) = \sum_{p=1}^{\infty} B_p h_p(t) \quad (3)$$

其中 $h_p(t)$ 是规范化的高斯函数,具有可调整的标准方差 σ_p 和时-频中心 $\{t_p, f_p\}$:

$$h_p(t) = g_p(t - t_p) \exp\{j2\pi f_p t\}$$

$$g_p(t) = (\pi\sigma_p^2)^{-0.25} \exp\left\{-\frac{t^2}{2\sigma_p^2}\right\} \quad \sigma_p \in R^+, t_p, f_p \in R \quad (4)$$

由于这些可在时间、频率轴上移动的高斯函数并非一组正

交基,因而展开系数 B_p 的选择就不是唯一的。在 AGR 算法中, B_p 作为 $s_p(t)$ 与 $h_p(t)$ 的内积是通过循环程序优化选择的。从 $p = 1$ 开始循环,选择参数 σ_p, t_p 及 f_p , 以使 $h_p(t)$ 最“像” $s(t)$, 即:

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

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:

$$s_p(t) = s_{p-1}(t) - B_p(t) h_p(t) \quad (6)$$

上述过程循环进行,直至重建信号与原信号的误差 $\|s_{p+1}\|^2$ 递减至设定值,即获得原信号的理想 AGR 分解。

AGR 算法中最为困难的莫过于计算式(5)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,而(5)式中误差表面是相当复杂的,无法得到解析解。囿于算法的大计算量,一些经典的最优化算法,如模拟退火法,也不适于在此应用。为此,AGR 采用一种高效的数值算法,具体步骤详见文

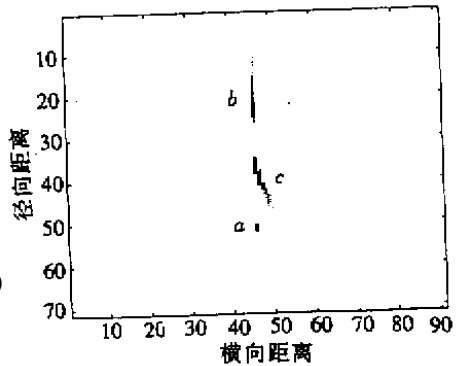


图 1 三个散射中心的 ISAR 图像
Fig.1 ISAR image of three effective scattering centers

献^[4]。在每次 d_p 循环中,从一个较大的方差 σ_p 初始值开始,使其对应的基函数在某段时间、频率轴上滑动,以搜索峰值。然后,将 σ_p 缩减 d 倍,进行新一次的精度更高的峰值搜索。而每一次峰值的搜索范围,都是以上一次搜索得到的峰值为中心的邻近区域,无须遍历整个时、频轴,大大提高了计算效率。

需特别指出的是, d 作为逐次搜索中多分辨基函数的方差递减因子,是决定算法精度与计算速度的重要因素。文献 4 对此未作分析,直接采用了类似小波分析的尺度平分方法,即取 $d = 2$ 。经分析和实验,并考虑到搜索精度与速度的折衷,对起伏较快的信号宜选取较小的 d 值 ($1.2 < d < 1.7$) 以提高搜索精度,而对相对平滑缓变的信号,可选取较大的方差初值和 d 值,在精度与速度上都会有所提高。

2.2 AGR 方法的仿真实验研究与性能分析

应用上述 AGR 算法对图 1 进行处理。固定横向距离在 $x = 46$ 处,沿径向作切片,使其通过 a 、 b 、 c 三个不同类型的散射中心,得到图 2 中实线所示曲线。对该曲线进行 AGR 分解并重构后如图 2 中的虚线所示。易见,AGR 方法用较少数目的基函数 ($N = 14$) 较为准确地分解、表示出了原信号。值得注意的是,AGR 分解所得参数中,点散射中心 a 对应的基函数方差 σ 最小,约为非点散射中心 b 所对应的方差的十分之一。这是由于 a 作为点散射中心,其散射强度基本不随频率变化,因而在时间轴上产生宽度很窄的脉冲, b 则反之。显然, σ_p 正是希望得到的能用来判别散射中心类型的重要参量。

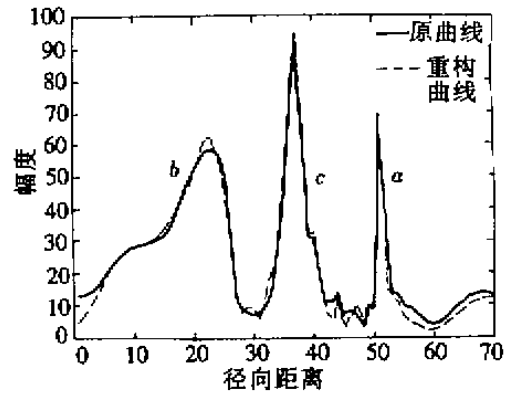


图 2 经过散射中心 a 、 b 、 c 的径向切片图 (实线)及 AGR 重构曲线 (虚线)

Fig.2 Original (realline) and AGR reconstructed (dashed line) image cut through scatterers a b c

理论分析和实验表明,利用 AGR 分解散射信号有如下突出的优点:

(1) AGR 中重建信号与原信号的误差量 $\|s_{N+1}\|^2$ 随着 N 的增加而单调递减。这使得计算复杂度与精度间的折衷便于观察与控制。并且,若加入新的基函数 $h_{N+1}(t)$,已计算得到的前 N 组参数仍然有效。

(2) AGR 作为一种参数化方法,与一般的时-频分析方法相比,具有较高的时-频分辨率。以短时傅里叶变换 STFT 为例,其频率分辨与时间分辨率是相互制约的,频率分辨率的提高以距离分辨率的降低为代价,而距离分辨率又取决于 STFT 采用的窗函数的带宽,而并非整个信号的带宽。AGR 方法从根本上避免了上述问题。

(3) AGR 方法物理意义明确,通过调整、控制基函数的展宽度,即参数 σ_p ,能对各散射中心随时间或频率变化的性状给予定量描述: σ_p 较大时,第 p 个时-频中心的基函数具有大的展宽度,表明该散射中心对时间或频率具有较强依赖性,是非点散射结构; σ_p 相对很小时,则表明该处对应的是近似点散射中心。这样,以 σ_p 为判别量,可以自动地将目标上的理想点散射中心与非点散射的结构区分开来。

3 基于 AGR 处理的 ISAR 图像时-频分析实例研究

3.1 AGR 方法在后向散射信号时频分析中的应用

时-频分析能在二维时频空间中,使各种电磁散射现象更为清晰、直观地以不同的形式展现出来。图 3 所示为典型散射结构的时-频平面分布示意图。点散射中心对所有散射频率的响应均发生在某一特定时刻,在时-频图中表现为一条垂直线(图 3a);具有谐振现象的目标,散射主要集中在其特有频率上,因而对应的是水平线(图 3b);至于其它复杂的扩展散射现象,则以若干不同形状的曲线在时-频图中得以刻画。其中一种类似波导结构的散射,在时-频图中的特征为具有负斜率的曲线(图 3c)^[5]。

利用 2.3 仿真试验中,对经过 a 、 b 、 c 三个等效散射中心的径向切片的 AGR 分解结果,构画其对应的时-频分布图,如图 4。从中不难分析、判断出: a 是理想的点散射中心; b 是具有谐振现象的散射中心; c 是具有某种复杂分布式散射结构的非点散射中心。此结论与仿真模型相吻合。

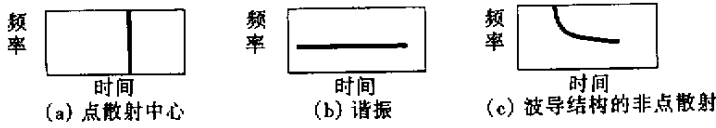


图 3 典型类型的散射机制时-频分布示意图

Fig.3 Time-frequency features of some typical scattering mechanics

3.2 飞机目标 ISAR 图像的 AGR 时-频分析实例研究

用 AGR 方法分析处理 ISAR 图像有两种方式, 分别对应不同的物理意义。第一种方式, 对固定的横向距离 x , 沿径向作 AGR 分解, 对整幅 ISAR 图像的处理即为逐条遍历径向线的处理, 此时 σ_p 的大小反映第 p 个时-频中心对频率变化依赖性的强弱。相应地, 第二种方式, 沿横向作 AGR 分解, 依据 ISAR 成像原理, 横向距离分辨来自方位角的变化积累, 因而这种方式下的 σ_p 值是反映第 p 个时-频中心对方位角敏感程度的数量指标。

下面的例子是基于飞机目标数据的。

例 1 图 5 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 9 GHz, 带宽 150 MHz 下的实测数据, 经运动补偿后成像得到的。为便于研究典型非点散射效应, 选取如图中虚线所示的穿过模糊区域的横向切片, 其二维时-频分布如图 6 所示, 为便于比照, 将原曲线沿二维图的横轴摆放。易见, 原曲线中第一个展宽的峰值 $\langle 1a \rangle$, 在二维谱图中被解构成两个分离的散射机制 $\langle 1a \rangle$

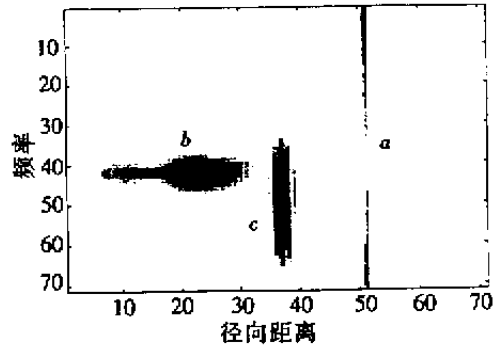


图 4 等效散射中心 a、b、c 的 AGR 分解时-频分布图

Fig.4 AGR time-frequency image of scattering centers a b c

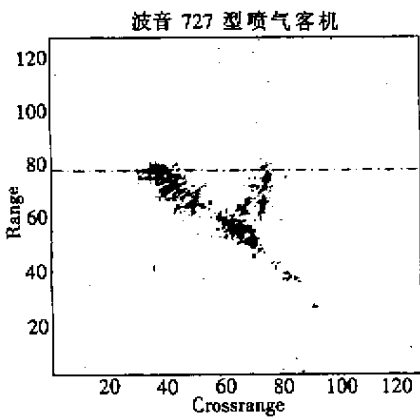


图 5 波音 727 型喷气客机的 ISAR 图像
Fig.5 ISAR image of Boeing 727 jet plane

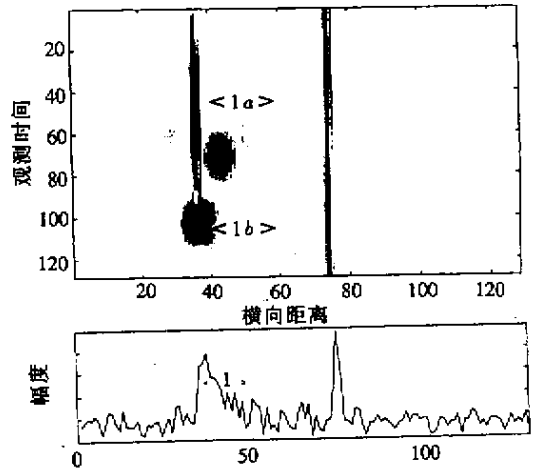


图 6 横向切片及其 AGR 时-频分布图
Fig.6 Image cut and its AGR T-F image

$\langle 1a \rangle$ 与 $\langle 1b \rangle$ 。结合成像原理, 其物理意义是: 来自同一段横向距离单元的散射, 随着观测角的改变而变化。等效散射中心由观测前期的准点散射, 随入射角的改变, 在后期呈现出非点散射的特性。实际上, 此横向距离单元对应的目标真实空间位置上是飞机尾喷管, 在高频散射的机理分类中属于凹腔结构, 当视角由近于侧射方向渐变至近于尾追方向, 其主要的散射作用变为来自凹腔内表面间的多次反射并叠加唇口的绕射, 这种随入射角变化的复杂的非点散射过程, 是造成 ISAR 图像横向模糊的原因。这种模

糊可通过去除 AGR 分解中的大方分量加以消除。

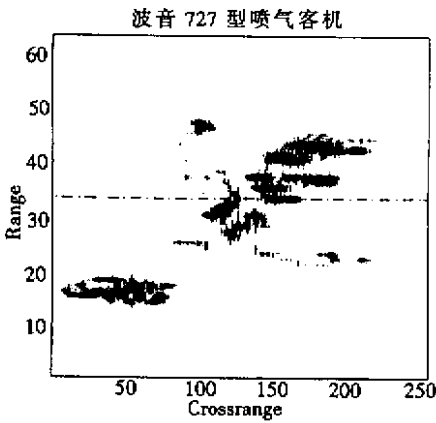


图7 波音 727 型喷气客机的 ISAR 图像
(不完全运动补偿)

Fig.7 ISAR image of Boeing 727 jet plane
(with incomplete motion compensation)

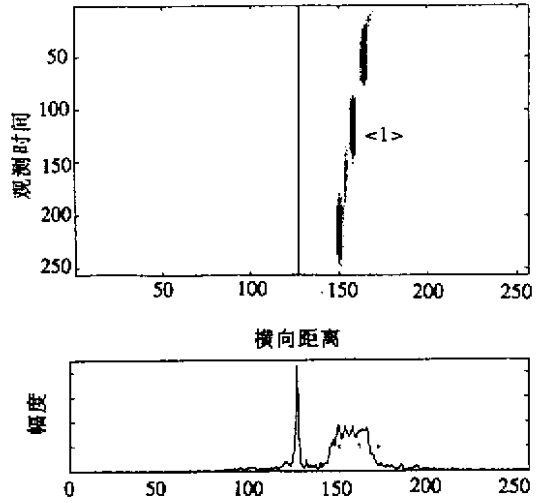


图8 横向切片及其时-频分布图

Fig.8 Image cut and its AGR T-F image

例2 图7是波音727型喷气客机未经完全运动补偿所成的ISAR图像。不可避免地,图像中存在横向的模糊。依照例1的方法,选取存在模糊现象的局部,沿图中虚线作横向切片,所得曲线的AGR时-频分布如图8。易见,横向距离上的模糊被分解为若干来自连续横向距离单元的,在连续观测时间上的散射。也就是说,该等效散射中心的散射强度等性状基本保持不变,其位置却随时间发生偏移。显然,这是运动补偿不完全带来的必然后果,与例1中产生模糊的散射机制有本质的区别,这种横向模糊只能通过进一步地运动补偿来消除。

以上两个例子,同样是针对飞机目标ISAR图像中模糊现象的局部进行分析,得益于AGR方法的优越性,使造成横向模糊的不同机制在二维时-频平面中充分展现,从而可对模糊现象进行物理定义、明确地解释,并确定合理的消除方法。

4 结论

本文针对复杂目标ISAR图像中理想点散射中心与非点散射效应并存的现象,阐述了一种自适应的ISAR图像时-频分析方法,结合实验,对其性能进行了较为深入的研究。理论分析及实验表明,应用该方法,能在不损失分辨率的情况下自动区分图像中的理想点散射中心与非点散射中心,在二维时-频平面中,解构出非点散射结构,提取到其中可用作目标识别特征的信息。

参考文献:

- [1] Wehner D R. , High Resolution Radar [M], Artech House , 1995.
- [2] 张直中,微波成像术 [M], 科学出版社 ,1990.
- [3] Rihaczek A. W. and Heerskowitiz S. J. , Man-made target backscattering behavior :Applicability of conventional radar resolution theory [J], IEEE Trans. AES , 1996 , 32(4).
- [4] Qian S. and Chen D. , Signal representation using adaptive normalized Gaussian functions [J], Signal Processing , 1994 , 36(1).
- [5] Moghaddar A. and Walton E. K. , Time-Frequency Distribution Analysis of Scattering from Waveguide Cavities [J], IEEE Trans. AP , 1993 , 41(5).

