

## 基于小波变换的合成孔径雷达运动目标 多普勒参数提取算法<sup>1</sup>

李 刚 朱敏慧 朱锡兴

(中国科学院电子学研究所七室 北京 100080)

**摘 要** 本文基于合成孔径雷达成象处理中运动目标回波信号的频谱特点以及 WVD 变换的性质, 讨论了 WVD 的双线性特性在用于运动目标多普勒参数提取, 特别是用于多点目标及面目标成象处理时的缺陷, 并结合小波变换特点, 分析了小波变换用于运动目标多普勒参数提取的可行性和用于多点目标和面目标情况下的内在优势, 在此基础上提出了基于小波变换的合成孔径雷达运动目标多普勒参数提取算法, 计算机仿真结果验证了算法的可行性。

**关键词** 运动目标成象, 多普勒参数, WVD 变换, 双线性特性, 小波变换, SAR

**中图分类号** TN953

### 1 引 言

合成孔径雷达 (SAR) 成象的高分辨率来自于对其距离向和方位向的脉冲压缩, 距离向脉冲压缩所需参考函数由发射脉冲的线性调频率等参数决定; 而方位向的脉冲压缩所需要的参考函数则是由雷达平台的运动速度和方位向波束宽度等决定。通常不仅要在地物环境 (静止目标) 成象, 还应对其中的运动目标成象。

运动目标和静止目标的主要区别在于其径向速度上的差别, 静止目标的径向速度仅由雷达平台的运动状态决定; 而运动目标由于本身相对于雷达平台就存在着径向速度, 从而使其在整个孔径范围内频谱的变化规律与静止目标不同, 通常需要通过 SAR 原始回波数据的处理, 提取运动目标的多普勒参数, 以便对运动目标和静止目标分别成象、综合显示。

在合成孔径雷达成象处理中, 某一时刻的回波信号中都包含着来自于静止目标、运动目标的回波和地面杂波信号; 在频谱上可能彼此分开也可能相互混叠, 对于前一种情况, 可采用多普勒滤波或时空移变滤波器将运动目标的频谱分离出来; 对于后一种情况, 可采用相邻时间段频谱互相关法将运动目标频谱分离出来。因此, 要准确地对运动目标进行成象, 除最大限度地抑制杂波信号和将运动目标频谱有效分离出来外, 还必须从分离出来的运动目标频谱中准确地提取成象所必需的多普勒参数: 线性调频率  $f_r$  和多普勒中心频率 (载频)  $f_c$ , 然后建立聚焦函数并形成合成孔径以获得运动目标的高分辨率图象。

有效地提取运动目标的多普勒参数, 首先应将频谱分离后的 SAR 回波信号变换到时频域, 通过某种二维时频分布来解决时频分辨率之间的矛盾; 通常用于运动目标多普勒参数提取的二维时频分布主要是 Wigner-Ville 分布 (WVD) 和小波变换方法。

本文首先分析 SAR 成象处理中运动目标回波信号的频谱特点, 在此基础上讨论 WVD 方法用于运动目标多普勒参数提取时的缺陷, 最后集中讨论使用小波变换方法提取运动目标多普勒参数的方法。

<sup>1</sup> 1996-10-14 收到, 1997-06-23 定稿

## 2 SAR 运动目标回波信号的频谱特点

在 SAR 成象处理中, 回波信号的相位变化通常可以用雷达平台与地面目标之间的相对运动的距离多普勒历程表示; 在载机作匀速直线运动情况下, 距离多普勒历程表示式为

$$R(t) \approx R_0 + V_r t + \{[V_a - V_c]^2 + R_0 a_r\} \cdot t^2 / (2R_0), \quad (1)$$

式中  $R_0$  表示  $t = 0$  时雷达平台与目标之间的斜距,  $V_r$ 、 $a_r$  分别为目标沿距离向的速度和加速度在斜距方向上的投影 (径向速度和径向加速度),  $V_c$ 、 $a_c$  分别为目标沿方位向的速度和加速度,  $V_a$  为雷达平台的速度,  $t$  为天线照射有效时间, 则相位多普勒历程为

$$\varphi(t) = 4\pi R(at) / \lambda. \quad (2)$$

由此可见, SAR 回波信号为一个具有二次相位调制的线性调频信号。对于运动目标, 成象处理所必需的两个多普勒参数分别为多普勒中心频率  $f_c$  和多普勒线性调频率  $f_r$  :

$$f_c = 2V_r / \lambda, \quad f_r = 2[(V_a - V_c)^2 + R_0 a_r] / (\lambda R_0). \quad (3)$$

由 (3) 式可知, 因径向速度  $V_r$  的存在, 运动目标的多普勒频移不同于完全由雷达载机本身的运动而引起的多普勒频移, 从而引起中心频率发生偏离, 频谱移出杂波区 (静止目标成象区), 进入 MTI 可检测区。因此, 若有运动目标存在, 回波信号的频谱将出现静止目标成象处理区和运动目标成象处理区。

## 3 基于 WVD 的运动目标多普勒参数提取算法的缺陷

### 3.1 WVD 变换的定义和主要性质

连续时间信号  $x(t)$  和  $y(t)$  的 (互)WVD 定义为

$$W_{x,y}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi f\tau} x(t + \tau/2) y^*(t - \tau/2) d\tau. \quad (4)$$

当  $x(t) = y(t)$  时, 连续时间信号  $x(t)$  的 WVD 定义为

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi f\tau} x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) d\tau. \quad (5)$$

其频域表示式为

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f + \eta/2) X^*(f - \eta/2) e^{j2\pi t\eta} d\eta. \quad (6)$$

离散时间信号  $x(n)$  的 WVD 定义为

$$W(n, \pi l / (2N - 1)) = 2 \sum_{k=-N+1}^{N-1} f(n+k) f^*(n-k) \exp\{-j2\pi kl / (2N - 1)\}. \quad (7)$$

由 WVD 定义可以导出 WVD 变换的一些重要性质; 在 WVD 变换的诸多性质中, 阻碍其用于多点或面运动目标成像处理的为其双线性特性。

### 3.2 基于 WVD 变换的运动目标多普勒参数提取算法的缺陷

对于单个点运动目标 (或少数分布较为分散、彼此相关性较小的点运动目标) 情况, 基于 WVD 变换方法的运动目标多普勒参数提取算法的确是一种较为有效的方案<sup>[1]</sup>。然而, 当地面目标运动状态较为复杂 (例如对于多点运动目标或面运动目标情况), 或点运动目标分布较为集中且彼此之间相关性较大时, 采用 WVD 变换方法提取运动目标多普勒参数就会带来很多不便。主要原因在于 WVD 变换的双线性性质, 即多个信号的 WVD 之间将出现交叉项, 从而在聚焦成像后将产生虚象。

若回波信号  $z(t) = x(t) + y(t)$ , 则其 WVD 变换为

$$W_z(t, f) = W_x(t, f) + W_y(t, f) + 2\text{Re}\{W_{x,y}(t, f)\}, \quad (8)$$

其中  $2\text{Re}\{W_{x,y}(t, \omega)\}$  项即为  $x(t)$  和  $y(t)$  之间的交叉项, 聚焦成像后将产生虚象。尽管一些基于 WVD 的运动目标多普勒参数提取改进算法<sup>[2,3]</sup>在一定程度上减小了交叉项的影响, 但都未从根本上解决 WVD 本身所固有的双线性所带来的弊端。

图 1 为采用扩展 WVD(EWVD) 变换方法提取多点运动目标多普勒参数的回波信号频谱和地面成像图, 其中存在明显的虚象, 且随着点目标数目的增加, 交叉项的影响愈为突出。因此 WVD 变换及其改进算法并不适于多点运动目标或面运动目标情况下的多普勒参数提取。而作为二维时频分布的小波变换的线性特性, 在提取运动目标多普勒参数时, 则不存在交叉项的影响, 因此能够成出准确的点运动目标图象并维持成像的高时频分辨率。

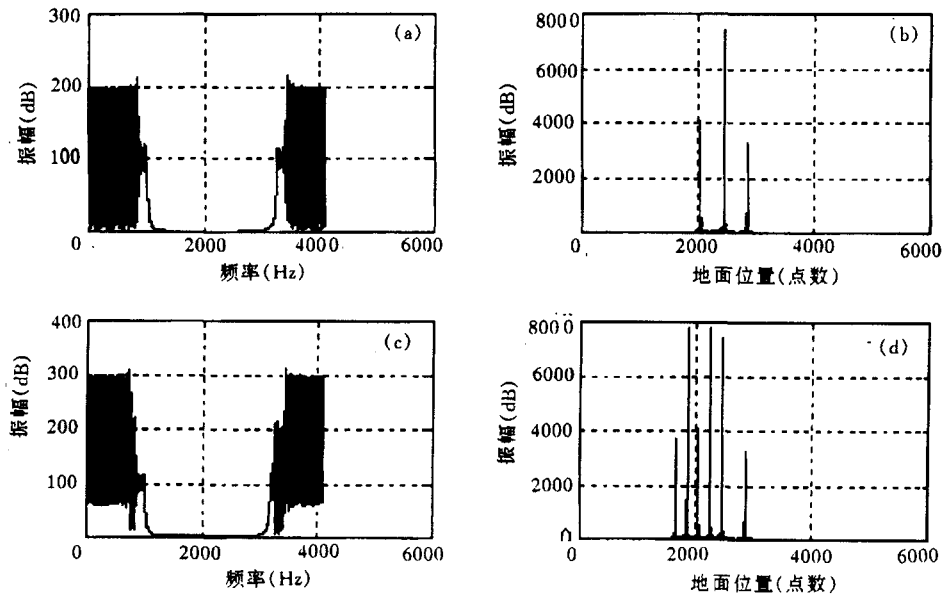


图 1 (a) 两点运动目标回波频谱 (b) 两点运动目标 EWVD 地面成像图  
(c) 三点运动目标回波频谱 (d) 三点运动目标 EWVD 地面成像图

## 4 基于小波变换的运动目标多普勒参数提取算法

### 4.1 小波变换的定义及其线性性质

连续小波变换 (CWT) 定义为

$$W_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \varphi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (9)$$

其频域定义式为

$$W_x(a, b) = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \Phi^*(a\omega) e^{j\omega b} d\omega, \quad (10)$$

其中  $\varphi(t)$  为基本小波,  $\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)$  为小波函数,  $a$  为尺度 (频率) 因子,  $b$  为 (时间) 延迟因子。

小波变换的线性特性, 即

$$z(t) = m \cdot x(t) + n \cdot y(t) \Rightarrow W_z(a, b) = mW_x(a, b) + nW_y(a, b). \quad (11)$$

### 4.2 基于小波变换算法提取运动目标多普勒参数

4.2.1 多点运动目标 对于多点运动目标, 假设各点目标信号均为线性调频信号, 则回波信号为

$$x(t) = \sum_{i=1}^M x_i(t) = \sum_{i=1}^M \sigma_i \exp\{-j2\pi[f_{ci}t + (f_{ri}/2)t^2]\}. \quad (12)$$

由小波变换的线性性质可得回波信号的连续小波变换为

$$W_z(a, b) = \sum_{i=1}^M W_{x_i}(a, b). \quad (13)$$

显然, 回波信号连续小波变换表达式中不存在交叉项, 因此聚焦成像时不会出现散焦虚像。

4.2.2 面运动目标 面运动目标可看作由具有相同运动状态的多个点散射体所组成, 各子元信号具有相同的多普勒中心频率  $f_c$  和多普勒线性调频率  $f_r$ 。这取决于面运动目标的运动参数, 在其时频平面上的回波信号投影曲线 (回波信号小波变换的等高线) 为围绕一直线来回波动的振荡曲线, 由直线的斜率和在频率轴上的截距即可确定面运动目标的成象参数, 即面运动目标的多普勒中心频率和多普勒线性调频率。

4.2.3 运动目标多普勒参数提取 基于小波变换提取运动目标多普勒参数的精度与基本小波函数的选取有直接的关系; 首先应根据运动目标回波信号的频谱特点选择合适的基本小波函数; 一般多选择具有较好高斯外形的 Morlet 小波。

运动目标回波信号的瞬时频率表示式为

$$f(t) = [1/(2\pi)] \cdot [\partial\varphi(t)/\partial t] = \int_{-\infty}^{+\infty} f \cdot W_x(t, f) df / \int_{-\infty}^{+\infty} W_x(t, f) df, \quad (14)$$

其多普勒频率变化率为

$$f_{dr}(t) = \partial f(t)/\partial t. \quad (15)$$

通常可借助运动目标回波信号的小波变换在时频平面上的投影, 即等高线来确定运动目标的多普勒参数—等高线以一直线为轴来回振荡, 轴线的斜率为运动目标的多普勒线性调频率,

轴线在频率轴上的截距为运动目标的多普勒中心频率。对于多点运动目标,各自的小波变换的等高线具有不同的斜率和频率轴截距,且其轴线相互分开。

#### 4.3 运动目标多普勒参数估计

此外,运动目标的精确成像还取决于对运动目标多普勒参数的准确估计。

4.3.1 多普勒线性调频率  $f_r$  运动目标回波信号的线性调频率:

$$f_r = -[k/(\pi R_0)](v_a/f_{\text{PRF}})^2[(1 - \varepsilon_c)^2 - \varepsilon_r] \approx -0.9259 \times 10^{-4} D, \quad (16)$$

其中  $(1 - \varepsilon_c)^2 - \varepsilon_r = D$ ,  $D$  的精度应满足:  $|D - \hat{D}| < 2/k = 4\rho_a^2/R\lambda$ 。

4.3.2 多普勒中心频率(载频)  $f_c$  载频的精确位置由回波信号的时频能量分布决定:

$$(4\pi/\lambda) \cdot (v_a/f_{\text{PRF}}) \cdot \varepsilon_r = (4\pi/\lambda) \cdot (v_p r/f_{\text{PRF}}). \quad (17)$$

## 5 计算机仿真结果及结论

我们采用上述连续小波变换方法提取运动目标的多普勒参数后所得地面运动目标的聚焦图象如图 2 所示。为了比较方便并不失一般性,我们仍取上文所采用的两点和三点运动目标分别进行成像,所采用的参数也与前面所采用的参数完全一致。计算机仿真结果表明,采用小波变换方法提取运动目标多普勒参数后的聚焦图象中不存在 WVD 变换的交叉项所引入的虚象,从而能够实现准确成像的目的。

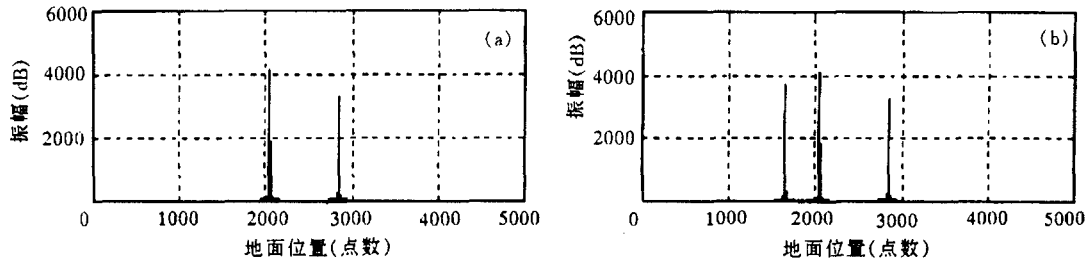


图 2 (a) 两点运动目标 CWT 地面成像图 (b) 三点运动目标 CWT 地面成像图

通过以上分析及计算机仿真结果,我们可以得出如下结论:

对于合成孔径雷达回波信号中运动目标的多普勒参数的提取,对于单点运动目标,采用 WVD 变换提取参数后能够准确地聚焦成像,但对于多点运动目标及面运动目标等复杂情况,WVD 因其双线性特性,即交叉项的影响将在聚焦成像后产生虚像;而具有线性特性的小波变换则能较好地解决时频分辨率与计算复杂性之间的矛盾,准确地进行多点运动目标成像。

## 参 考 文 献

- [1] Barbarossa S, Rarina A. Detection and Imaging of moving objects with SAR, Part 2: Joint Time-Frequency Analysis by Wigner-ville Distribution. IEE Proc.-F 1992, 139(1): 79-97.
- [2] 王 韬. 合成孔径雷达运动目标成像算法研究: [硕士论文]. 中国科学院电子学研究所, 1995.
- [3] 何峻湘. WVD 用于 SAR 运动目标检测和成像的参数估计. 电子科学学报, 1995, 17(6): 585-590.

## DOPPLER PARAMETER EXTRACTION OF MOVING TARGETS IN SAR IMAGING BY WAVELET TRANSFORM

Li Gang    Zhu Minhui    Zhu Xixing

(*Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing 100080*)

**Abstract** In this paper, the shortages of WVD's double-linearity in extracting the Doppler parameters of moving-targets are discussed, especially in multi-point moving-targets imaging processing based on the spectrum characteristics of moving-target echo signals in Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging processing and the properties of WVD. Combined with the characteristics of Continuous Wavelet Transform (CWT), the responsibility and advantages of CWT in multi-point moving-target Doppler parameters extraction are analyzed. Finally a kind of multi-point moving-target Doppler parameters extracting algorithm based on CWT are developed, and the computer stimulating results demonstrate the correctness of the algorithm.

**Key words** Moving targets imaging, Doppler parameters, WVD transform, Double-linearity, Wavelet transform, SAR

李 刚: 男, 1968 年生, 博士, 专业: 信号与信息处理, 研究方向: 合成孔径雷达 (SAR) 运动目标成像算法及硬件实现.

朱敏慧: 女, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, IEEE 高级会员, 中科院电子所所长, 主要从事微波遥感、雷达信号处理和计算机应用方面的研究工作.

朱锡兴: 男, 1938 年生, 研究员, 从事微波遥感和数字信号处理方面的研究工作.