

基于扩展小波变换的机载 SAR 运动目标参数估计¹

李 刚 朱敏慧*

(北京市遥感信息研究所一室 北京 100011)

*(中国科学院电子学研究所 微波成像技术国家重点实验室 北京 100080)

摘 要 该文在分析机载合成孔径雷达 (SAR) 运动目标回波信号频谱特点的基础上, 基于扩展 WVD(EWVD) 变换理论提出了扩展小波变换 (EWT) 算法的基本思想, 并针对分别利用扩展 WVD 变换和扩展小波变换方法进行机载 SAR 运动目标多普勒参数估计时的特点进行比较分析, 指出基于扩展小波变换方法进行机载 SAR 运动目标回波信号参数估计的可行性及优越性, 微机仿真实验结果验证了其结论的正确性。

关键词 机载 SAR, 运动目标, 多普勒参数估计, EWVD 变换, 扩展小波变换

中图分类号 TN951, O177.6

1 引 言

在机载合成孔径雷达 (SAR) 回波信号成像处理中, 不仅要求对地物环境 (静止目标) 进行成像, 还要求对地面目标场中的运动目标进行检测和成像。

机载 SAR 某一时刻的回波信号中包含来自静止目标、运动目标的回波信号及地面杂波干扰信号。这些信号在频谱上可能彼此分开也可能相互混叠, 需要对原始回波信号进行相应处理, 以提取目标成像参数, 并进行聚焦成像和显示。这里, 我们主要关心原始回波信号中的运动目标, 运动目标和静止目标的主要差别在于其径向速度, 静止目标的径向速度仅由雷达平台本身的运动状态决定; 而运动目标由于本身相对于雷达平台就存在着径向速度, 使其频谱的变化规律与静止目标不同^[1]。因此, 不能按常规模式 (静止目标成像模式) 处理运动目标。对于机载 SAR 原始回波信号, 首先需将运动目标频谱有效地分离出来。通常, 对于运动目标和静止目标的频谱相互分离情况, 可采用多普勒滤波或时空移变滤波器分离运动目标频谱^[2], 而对于运动目标和静止目标频谱相互混叠的情况, 可采用相邻时间段频谱互相关法分离运动目标频谱^[3]。

对机载 SAR 运动目标的检测 / 成像处理过程, 实质上就是对其多普勒调制参数 (多普勒中心频率 f_c 和线性调频率 f_r)^[4] 的提取及参数估计过程。尽管运动目标和静止目标回波信号均近似为线性调频时变信号, 但因为其各自的初始位置和运动状态不同, 相应回波信号的多普勒调制参数也不同。通常, 采用二维时频变换对机载 SAR 原始回波信号频谱进行分析。对于单点目标, 无论是静止的还是运动的, 其回波信号的二维时频谱在时频平面上的投影均为以一直线为中心轴线的振荡曲线, 即其二维时频曲线的峰值分布在时频平面内一条 (瞬时频率) 直线上。理论上讲, 不同目标所对应的瞬时频率直线的斜率和频率轴截距是不同的, 也就是说, 机载 SAR 原始回波信号中的运动目标 (包括静止目标) 应与其时频平面上的瞬时频率直线一一对应。运动目标的检测 / 成像处理过程实质上就是二维时频平面上 (瞬时频率) 直线参数 (斜率和频率轴截距) 的提取和参数估计过程^[5]。

通常, 点运动目标的多普勒中心频率与其径向速度成正比; 而其多普勒线性调频率与其方位向速度和径向加速度有关, 而不仅仅只与雷达参数有关。因径向速度的存在, 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, 从而使其中心频率发生偏离, 频谱将移出杂波成像区 (静止目标成像区), 进入 MTI 区。通过进一步分析^[6] 我们知道, 点运动目标的多普勒中心频率和线性调频率分别对应于其回波信号瞬时频率 (IF) 直线的频率轴截距和斜率。

¹ 1999-06-11 收到, 1999-10-29 定稿

2 基于 WVD 变换的机载 SAR 运动目标参数估计

2.1 Wigner-Ville 分布 (WVD) 变换

连续信号 $x(t)$ 的 WVD 变换定义为

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi f\tau} x(t + \tau/2)x^*(t - \tau/2)d\tau \quad (1)$$

其频域表示式为

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

离散信号 $x(n)$ 的 WVD 变换定义为

$$W(n, \pi l/(2N - 1)) = 2 \sum_{k=-N+1}^{N-1} f(n+k)f^*(n-k) \exp\{-j2\pi kl/(2N - 1)\} \quad (3)$$

由 WVD 变换的定义可推导出它的一些重要性质^[7]。一般情况下, WVD 变换具有两项特性对分析时变信号非常有用:

(1) 特定时间分布的平均频率等于信号的瞬时频率

$$f_x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} fW_x(t, f)df / \int_{-\infty}^{+\infty} W_x(t, f)df \quad (4)$$

(2) 特定频率上的平均时间等于群延迟

$$t_x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} tW_x(t, f)dt / \int_{-\infty}^{+\infty} W_x(t, f)dt \quad (5)$$

此外, WVD 变换具有较高的时频分辨率; 线性调频信号 WVD 变换的时频谱能量沿时频平面上一直线 (IF 直线) 分布, 直线的斜率和频率轴截距分别对应于线性调频信号的调频率和中心频率。

2.2 机载 SAR 模拟回波信号的 WVD 变换

我们选用一组与实际机载 X 波段 SAR 系统参数相近的模拟指标:

雷达发射波长 $\lambda = 0.032\text{m}$	雷达成像分辨率 $\rho = 10\text{m}$
作用距离 $R = 20\text{km}$	天线夹角 $\beta = 0.02^\circ$
载机飞行速度 $v_a = 150\text{ m/s}$	雷达发射脉冲重复频率 $f_{\text{PRF}} = 900\text{Hz}$

则机载 SAR 方位向回波信号为

$$S_{am}(x) = W[(1 - \dot{\epsilon}_c)x]e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}\dot{\epsilon}_r x}e^{-j\frac{2\pi}{\lambda R}[(1 - \dot{\epsilon}_c)^2 - \dot{\epsilon}_r]x^2} \quad (6)$$

SAR 是以脉冲方式工作的, 实际方位向回波信号为上式的采样 (以 f_{PRF} 为采样率)。 x 的离散化由 v_a/f_{PRF} 决定, 即 $x = (v_a/f_{\text{PRF}})i$, 则上式变为

$$S_{am}(i) = W[(1 - \dot{\epsilon}_c)(v_a/f_{\text{PRF}}) \cdot i] \exp\{-j2k\dot{\epsilon}_r(v_a/f_{\text{PRF}}) \cdot i\} \\ \times \exp\{-jk(v_a/f_{\text{PRF}})^2 \cdot i^2[(1 - \dot{\epsilon}_c)^2 - \dot{\epsilon}_r]/R_0\} \quad (7)$$

由上式我们可推导出关于 i 的线性调频率为

$$f_r(i) = \frac{-k}{\pi R_0} \left(\frac{v_a}{f_{PRF}} \right)^2 [(1 - \dot{\epsilon}_c)^2 - \dot{\epsilon}_r] \quad (8)$$

代入上述模拟机载 X 波段 SAR 系统参数后, 得

$$f_r(i) \approx -0.8681 \times 10^{-4} [(1 - \dot{\epsilon}_c)^2 - \dot{\epsilon}_r] \quad (9)$$

由 (9) 式可知, 回波信号调频率的值非常小, 对它进行精确估计的难度很大. 对于同一孔径内回波信号, 要求其最大二次相位误差不大于 $\pi/2$, 即

$$\pi \cdot \Delta f_r(i) \cdot i_{\max}^2 = \pi |\hat{f}_r(i) - f_r(i)| \cdot i_{\max}^2 \leq \pi/2 \quad (10)$$

则对 $f_r(i)$ 的估计精度误差应满足

$$\Delta f_r(i) \leq 1/(2i_{\max}^2) \quad (11)$$

由此可推导出回波信号 WVD 变换 IF 直线斜率为

$$k = 2N \Delta f_r(i) \quad (12)$$

则要求对其估计精度误差应满足

$$\Delta k = 2N \Delta f_r(i) < N/i_{\max}^2 \quad (13)$$

其中 N 为采样点数. 由此可知, 要满足对 k 的估计精度要求, 在 SAR 系统参数固定的情况下, 只有增加采样点数 N , 这是以增加系统运算时间和存储器容量为代价的. 相比之下, 扩展 WVD(EWVD) 变换可以较好地解决这个问题.

2.3 扩展 Wigner-Ville 分布 (EWVD) 变换

EWVD 变换的主要思想就是引入更多的数据参与运算, 从而在不增加系统运算时间的前提下提高参数的估计精度. 其定义如下:

$$\hat{W}_f(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t + l \times \tau/2) f^*(t - l \times \tau/2) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (14)$$

其中 l 为大于 1 的整数 (扩展因子), $\hat{W}_f(t, \omega)$ 为信号 $f(t)$ 的 EWVD 变换.

若假设 $h = l \times \tau$, $v = \omega/l$, 则 (14) 式变为

$$\begin{aligned} \hat{W}_f(t, \omega) &= \frac{1}{2\pi l} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t + h/2) f^*(t - h/2) \cdot e^{-j\omega h/l} dh \\ &= \frac{1}{2\pi l} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t + h/2) f^*(t - h/2) \cdot e^{-jvh} dh = \frac{1}{l} W_f(t, v) = \frac{1}{l} W_f\left(t, \frac{\omega}{l}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

即 EWVD 变换将 WVD 变换的频域坐标拓宽 l 倍.

设线性调频信号为

$$f(n) = e^{j(\varphi + 2\pi f n + \pi \mu n^2)} \quad (16)$$

则其 EWVD 变换为

$$\begin{aligned} \hat{W}_f(n, m) &= \sum_{-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}-1} e^{j(\varphi + 2\pi f(n+lk) + \pi \mu(n+lk)^2)} \cdot e^{-j(\varphi + 2\pi f(n-lk) + \pi \mu(n-lk)^2)} \cdot e^{-j2\pi k \frac{n}{l}} \\ &= \sum_{-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}-1} e^{j(4\pi f l k + 4\pi \mu l n k)} \cdot e^{-j2\pi k \frac{n}{l}} = \sum_{-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}-1} e^{-j2\pi k (\frac{n}{l} - 2f - 2\mu n)} \end{aligned} \quad (17)$$

则 $f(n)$ 的 EWVD 变换 IF 直线斜率为

$$k = m/N = 2N\Delta f_r l \quad (18)$$

由上式可知, 线性调频信号 EWVD 变换所对应的 IF 直线斜率较其 WVD 所对应的 IF 直线斜率扩展了 l 倍, 且随着 l 的增大而增大. 对线性调频信号所对应的 IF 直线进行斜率估计时, 若选用扩展因子远大于 1 的 l 值, 则在对 k 估计精度相同的情况下, 对 f_r 的估计精度将大大提高. 对于一般单点或分布较为发散的运动目标回波信号, 可通过计算其各自 EWVD 变换的重心获得其回波信号的瞬时频率, 进而得出其瞬时相位, 以建立相应参考函数信号, 用于 SAR 回波信号分析. 然而, 无论是 WVD 变换还是 EWVD 变换 (以下统称 WVD 变换) 都存在双线性特性, 在分析多目标回波信号时会带来很大麻烦^[8], 如图 1 所示. 同样作为二维时频变换的小波变换因其线性特性在分析多目标回波信号时将不存在交叉项干扰.

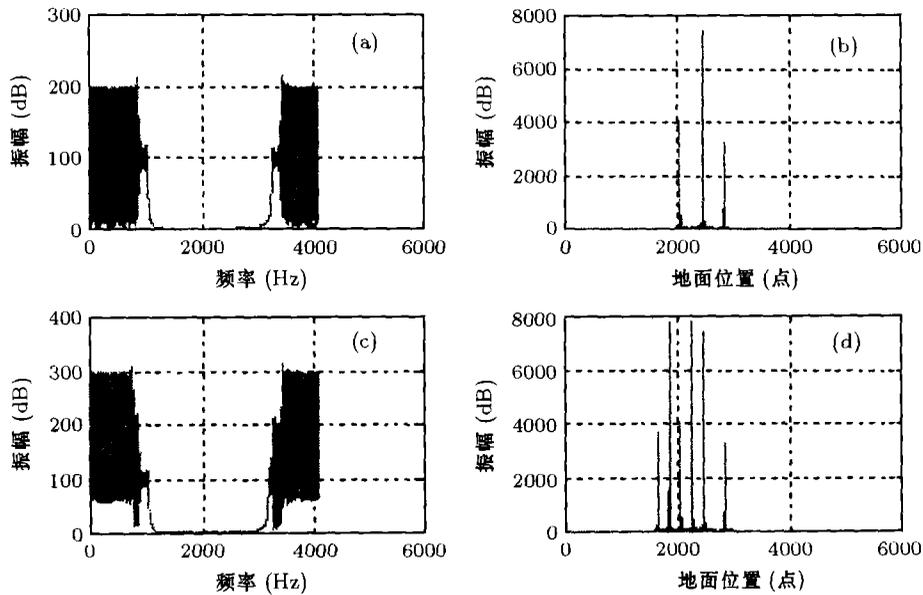


图 1 (a) 两点运动目标回波频谱 (b) 两点运动目标 EWVD 地面成像图
(c) 三点运动目标回波频谱 (d) 三点运动目标 EWVD 地面成像图

3 基于小波变换的机载 SAR 运动目标参数估计

3.1 小波变换的定义及其性质^[9]

信号 $x(t)$ 的连续小波变换 (CWT) 定义为

$$W_x(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \varphi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt / \sqrt{a} \quad (19)$$

其频域定义式为

$$W_x(a, b) = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \Phi^*(a\omega) e^{j\omega b} d\omega \quad (20)$$

其中 $\varphi(t)$ 为基本小波, $\varphi((t-b)/a)$ 为小波函数, a 为 (频率) 尺度因子, b 为 (时间) 延迟因子. 小波变换具有诸多性质, 其中一些对 SAR 回波信号分析十分有用, 如:

(1) 瞬时频率特性: 小波变换对于频率的一阶矩为其瞬时频率, 即对于信号 $x(t)$ 某一特定时间的小波变换 $W_x(a, b)$ 对频率的平均值等于信号 $x(t)$ 的瞬时频率:

$$f_x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f \cdot W_x(t, f) df / \int_{-\infty}^{+\infty} W_x(t, f) df \quad (21)$$

(2) 群延迟特性: 小波变换对于时间的一阶矩为其群延迟, 即对于信号 $x(t)$ 某一特定频率的小波变换 $W_x(a, b)$ 对时间的平均值等于信号 $x(t)$ 的群延迟:

$$t_x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} t \cdot W_x(t, f) dt / \int_{-\infty}^{+\infty} W_x(t, f) dt \quad (22)$$

(3) 尺度特性: 若信号 $x(t)$ 的小波变换为 $W_x(a, b)$, 则信号 $y(t) = x(t/\lambda)$ 的小波变换为

$$W_y(a, b) = \sqrt{\lambda} \cdot W_x(b/\lambda, a/\lambda) \quad (23)$$

(4) 线性特性:

$$z(t) = m \cdot x(t) + n \cdot y(t) \Rightarrow W_z(a, b) = mW_x(a, b) + nW_y(a, b) \quad (24)$$

由此可知, 小波变换的瞬时频率和群延迟特性表明可用于机载 SAR 回波信号的实时时频分析处理, 尤其适用于对频率随时间变化的非平稳随机信号的瞬时频率估计; 其尺度特性确保对时频平面内 IF 直线估计精度与 EWVD 相同的情况下对瞬时频率的估计精度将大大提高, 因为其尺度扩展是在时间和频率轴上同时进行的; 其线性特性则确保在分析多目标回波信号时不存在交叉项虚警。

3.2 机载 SAR 模拟回波信号的小波变换

为便于比较, 我们仍取与前面相同的模拟机载 X 波段 SAR 系统参数, 则机载 SAR 方位向回波信号如 (6) 式所示; 代入系统参数后的模拟回波信号线性调频率如 (8) 式所示; 对线性调频率的估计误差精度要求如 (10) 式所示; 模拟回波信号连续小波变换 (CWT) 的 IF 直线的斜率及其估计精度误差要求分别如 (11) 式和 (12) 式所示。由此可见, 对于单点目标, 若取回波信号的 CWT, 其 IF 直线斜率及其瞬时频率的估计精度与 WVD 变换并无本质区别, 要满足对其参数估计精度的要求, 在 SAR 系统基本参数固定的情况下, 只有通过增加采样点数 N , 即通过增加系统计算时间和存储器容量的方式实现。下面, 我们将引入扩展小波变换 (Extended Wavelet Transform, 简称 EWT) 的理论, 即通过对回波信号小波变换 (二维时频谱) 在时间轴和频率轴上同时扩展的方式, 提高回波信号参数估计精度。回波信号经扩展小波变换处理后, 其瞬时频率估计精度将远远优于 EWVD 的估计结果, 且时频谱中不存在交叉项影响, 系统处理时间和存储器容量将大大降低。

3.3 扩展小波变换 (EWT)

EWT 的基本思想就是借助于小波变换的尺度特性, 通过引入相应的尺度变换因子 (时间变换因子和频率变换因子), 在时间和频率轴上对分析信号的小波变换同时进行扩展, 从而引入更多的数据参与运算, 实现在不增加系统运算时间的前提下提高参数估计精度的目的。其定义如下:

$$\hat{W}_x(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \varphi^* \left(\frac{t - b/n}{a/m} \right) dt / \sqrt{a} \quad (25)$$

其中 m, n 分别为大于 1 的整数, 我们分别称之为时间扩展因子和频率扩展因子, $\hat{W}_x(a, b)$ 为信号 $x(t)$ 的 EWT。若假设 $t = \tau/n$, 则 (25) 式变为

$$\hat{W}_x(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau/n) \varphi^* \left[\frac{m(\tau - b)}{na} \right] d\tau / (n\sqrt{a}) \quad (26)$$

若取时间和频率扩展因子相同, 即 $m = n$, 则

$$\hat{W}_x(a, b) = W_x(b/n, a/n)\sqrt{n}/n = W_x(b/n, a/n)/\sqrt{n} \quad (27)$$

可见, EWT 分别将 CWT 的时间轴和频率轴坐标拓宽了 n 倍。若仍取如 (16) 式所示的线性调频信号, 则其 EWT 的 IF 直线斜率为

$$k = 2N\Delta f_r n^2 \quad (28)$$

与 (11) 式相比, EWT 的 IF 直线斜率较 CWT 和 WVD 的 IF 直线斜率扩展了 n^2 倍, 且随着 n 的增大而增大。对时频平面内的 IF 直线进行斜率估计时, 若选用扩展因子远大于 1 的 n 值, 则在保持对 k 估计精度相同的情况下, 对 f_r 的估计精度将远大于 WVD 和 CWT 方法的估计精度, 较 EWVD 方法也提高了 n 倍。

由 (19) 式可以看出, 基于小波变换的机载 SAR 运动目标多普勒参数估计精度与基本小波的选取有直接关系^[5]。尤其是对于 EWT, 由 (27) 式可知, 尽管扩展小波变换能够提高参数估计精度, 但其 EWT 主瓣幅度也随之下降 (为 CWT 幅度的 $1/\sqrt{n}$), 且下降速度随着 n 的增大而加快。因此, 采用 EWT 算法进行运动目标多普勒参数提取时, 除应尽量提高参数估计精度外, 还应选取能量分布尽可能集中的基本小波。仿真结果表明: 选择能量分布较为集中的 Morlet 小波或 Gaussian chirp 小波能得到较好的运动目标检测和参数估计效果。

3.3.1 Morlet 小波

$$\varphi(t) = e^{ibt} [e^{-t^2/2} - \sqrt{2}e^{-b^2/4}e^{-t^2}] \quad (29)$$

式中 $b = \sqrt{2\pi}/n \approx 5.332$, 其傅里叶变换为

$$\psi(\omega) = e^{-(\omega-b)^2/2} - e^{-[b^2+(\omega-b)^2]/4} \quad (30)$$

一般 Morlet 小波可近似表示为

$$\varphi(t) = e^{j2\omega f_0 t} e^{-t^2/2} \quad (31)$$

式中 f_0 为振荡频率, 当 $f_0 \geq 5$ 时, Morlet 小波为近似紧支集的, 其瞬时频率不随时间变化。其傅立叶变换为

$$\psi(\omega) = e^{-(\omega-2\pi f_0)^2/2} \quad (32)$$

3.3.2 Gaussian chirp 小波 Gaussian chirp 小波是在 Morlet 小波的基础上, 对其允许条件进行加强而得到的改进小波, 其瞬时频率将随时间线性增长, 即

$$\varphi(t) = e^{j[f_0 t + kt^2/2]} e^{-t^2/2} \quad (33)$$

式中 $f_0 \geq 5(\text{Hz})$, $k > 0$, k 为瞬时频率随时间的线性增长频率。

Morlet 小波和 Gaussian chirp 小波的时域波形图及其频谱图如图 2 所示。其中振荡频率 $f_0 = 5\text{Hz}$, 瞬时频率变化率 $k = 2$ 。

由小波变换的瞬时频率特性, 可推导出运动目标的瞬时频率表示式:

$$f(t) = [1/(2\pi)][\partial\varphi(t)/\partial t] = \int_{-\infty}^{+\infty} f\hat{W}_x(t, f)df / \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{W}_x(t, f)df \quad (34)$$

其多普勒频率变化率为

$$f_{dr}(t)\partial f(t)/\partial t \quad (35)$$

基于小波变换 (扩展小波变换) 进行机载 SAR 运动目标多普勒参数提取的最大优势在于其线性特性, 即在处理多目标回波信号时不存在交叉项虚警. 通常, 可借助于对运动目标回波信号 EWT 瞬时频率 (IF) 直线的斜率和频率轴截距的估计确定其多普勒参数: IF 直线的斜率对应于运动目标的多普勒线性调频率, IF 直线的频率轴截距则对应于运动目标的多普勒中心频率. 对于多点运动目标, 各自 EWT 所对应的 IF 直线具有不同的斜率和频率轴截距, 且相互分开, 如图 3 所示.

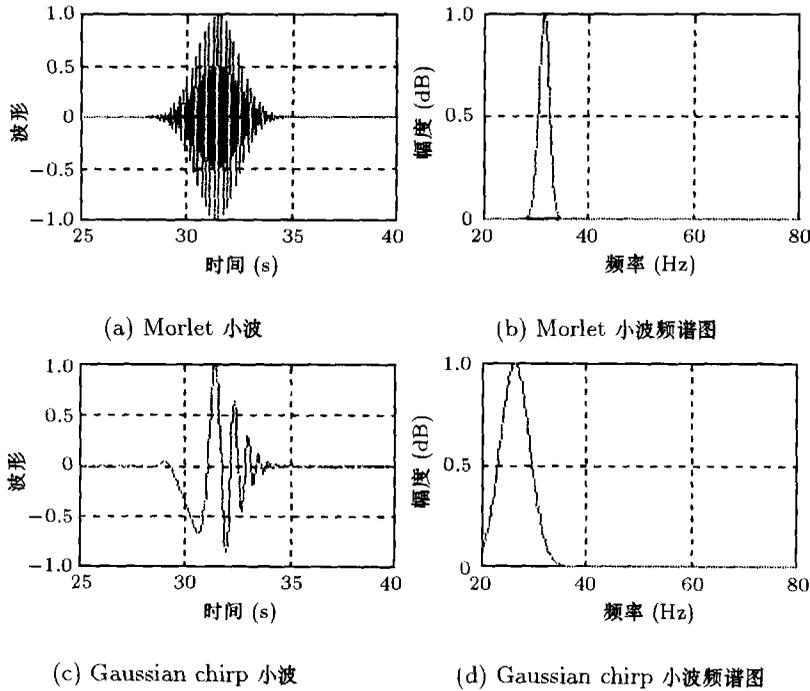


图 2 Morlet 小波和 Gaussian chirp 小波的时域波形图及其频谱图

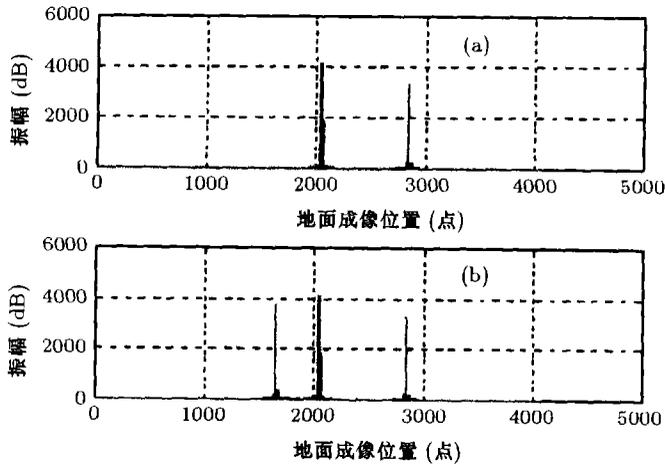


图 3 (a) 两点运动目标 EWT 地面成像图
(b) 三点运动目标 EWT 地面成像图

4 结 论

通过上面的分析我们可以得出这样的结论:

扩展小波变换 (EWT) 的基本思想就是借助于小波变换的尺度特性, 通过引入相应的尺度变换因子 (时间变换因子和频率变换因子), 在时间和频率轴上对分析信号的小波变换同时进行扩展, 从而引入更多的数据参与运算, 实现在不增加系统运算时间的前提下提高参数估计精度的目的。机载 SAR 回波信号经扩展小波变换处理后, 其瞬时频率估计精度将优于 EWVD 的估计结果, 且时域频谱中不存在交叉项影响, 系统处理时间和存储器容量将大大降低。实验结果证明了我们的结论。

参 考 文 献

- [1] R. K. Raney, Synthetic aperture imaging radar and moving targets, IEEE Trans. on AES, 1971, AES-7(3), 490-495.
- [2] J. Ender, *et al.*, Airborne MTI via digital filtering, Proc. IEE, 1989, 136(1), 22-28.
- [3] A. Freeman, A. Currie, Synthetic aperture radar imaging of moving targets, The GEC Journal of Research, 1987, 5(2), 106-115.
- [4] Zhao Zhiqin, Huang Shunji, A research of moving targets detection and imaging of SAR, Proc. EUSAR'96, Konigswinter, Germany, 1996, 427-430.
- [5] 李刚, 朱敏慧, 朱锡兴, 基于小波变换的 SAR 运动目标多普勒参数提取算法, 电子科学学刊, 1998, 20(2), 151-156.
- [6] S. Barbarossa, Doppler-rate filtering for detecting moving target with synthetic aperture radars, Proc. SPIE, 1989, 140-147.
- [7] 何峻湘, WVD 用于 SAR 运动目标检测和成像的参数估计, 电子科学学刊, 1995, 17(6), 585-590.
- [8] 李刚, 何映霞, 朱敏慧, 基于小波变换的机载 SAR 运动目标检测方法, 中国电子学会电路与系统学会第十四届年会论文集, 1998 年 4 月, 福州, 169-174.
- [9] [美] 崔锦泰著, 程正兴译, 小波分析导论, 西安, 西安交通大学出版社, 1995, 43-135.

AIRBORNE SAR MOVING TARGET PARAMETER ESTIMATION BASED ON EXTENDED WAVELET TRANSFORM

Li Gang Zhu Minhui*

(Institute of Geoscience Information, Beijing 100011, China)

*(Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract This paper presents the basic concept of Extended Wavelet Transform (EWT) algorithm based on Extended WVD (EWVD) transform theory after analyzing the spectrum characteristics of airborne SAR moving-target backscatters, and then takes a comparison and analysis on airborne SAR moving-target Doppler parameters estimation by EWVD and EWT methods respectively. The flexibility and advantage of airborne SAR moving-target Doppler parameters estimation based on EWT method are indicated and the simulating experimental results demonstrate the accuracy of our conclusion.

Key words Airborne SAR, Moving-targets, Doppler parameters estimation, EWVD, EWT

李 刚: 男, 1968 年生, 博士, 研究方向为合成孔径雷达实时数字成像处理及运动目标检测 / 成像技术。
朱敏慧: 女, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为合成孔径雷达信息获取与处理技术。