

# 一种单通道 SAR 地面运动目标成像和运动参数估计方法

周 峰,李亚超,邢孟道,保 铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室,陕西西安 710071)

**摘 要:** 根据单通道高分辨 SAR(Synthetic Aperture Radar)运动目标的回波包络和多普勒频谱的特性,本文提出一种利用二阶 Keystone 变换校正回波数据的距离弯曲,然后估计回波包络的斜率进行走动校正,再对运动目标的多普勒频谱进行分析得到运动目标的多普勒参数,进而对地面运动目标进行成像,同时完成对运动目标的定位,使运动目标在 SAR 图像中的正确位置上显示。另外,根据地面运动目标的多普勒参数和运动参数的关系,可以估计出运动目标的关键运动参数。结合仿真和实测数据的处理结果表明该方法可有效地对地面运动目标成像和运动参数估计。

**关键词:** 合成孔径雷达(SAR);地面运动目标显示(GMTI);Keystone 变换;运动参数估计

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2007)03-0543-06

## An Effective Approach to Ground Moving Target Imaging and Motion Parameter Estimation for Single Channel SAR System

ZHOU Feng, LI Ya-chao, XING Meng-dao, BAO Zheng

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Based on the envelopes and the characteristic of Doppler frequency spectrum of returns in single synthetic aperture radar(SAR) systems a method is proposed, which adopts two order Keystone Transform to adjust the range distortion of echo data, then the slopes of echoes' envelopes are estimated to make some adjustments of walk and the Doppler parameters of moving targets are obtained through analyzing the Doppler frequency spectrum of the moving targets. At last the images and positions of ground moving targets are gained, which make it possible that the moving targets can be indicated in right positions in SAR image. In addition the key motion parameters of moving targets can be estimated by the relationship between the Doppler parameters and motion parameters of ground moving targets. The results of the simulative and raw data show that this method can image ground moving targets and estimate motion parameters effectively.

**Key words:** synthetic aperture radar(SAR); ground moving target indication(GMTI); keystone transform; motion parameters estimation

### 1 引言

对 SAR 系统中的运动目标处理一般要经过运动目标检测、成像、定位和运动参数估计。在多通道 SAR 和高信噪比的单通道 SAR 系统中检测和提取动目标技术已经相对成熟<sup>[1~4]</sup>。目前,在 SAR 系统中对地面运动目标成像、定位、运动参数估计的方法多是先利用时频分析方法<sup>[5~7]</sup>得到运动目标的多普勒参数,再对其进行成像和定位。并且这些方法往往假设动目标的沿航向和垂直航向(径向)速度在相关积累过程中是恒定的,这样利用时频分析可以得到多普勒中心频率和多普勒调频率,通过多普勒参数和运动参数之间的关系可以得到动目标的沿航向和径向速度,而忽略运动目标的加速度。另外, R. P. Perry 等人<sup>[8]</sup>提出利用一阶 Keystone 变换校正距离走动,这样在距离弯曲不大的情况下可以利用最优匹配搜索估计出动目标的二次相位误差,在距离徙动校

正后再估计和校正动目标的高次相位误差,最后经过方位 FFT 在距离时域-多普勒域成像。该方法对于 Dechirp 数据或者距离弯曲比较小的数据能够很好地成像,但是对于高分辨的 SAR 数据,由于距离弯曲较大,利用搜索很难准确地估计出二次相位误差。另外,在该文献<sup>[8]</sup>中静止场景为距离时域-方位时域的图像,而动目标为距离时域-方位多普勒域的图像,这样必须经过较为复杂的变标操作才能使得动目标在静止场景中准确地显示。相比之下,本文方法除了能估计出运动目标的沿航向速度、径向速度外还可以估计出目标的径向加速度;另外,本文方法对于静止场景和地面运动目标的最后成像域都是时域,所以,对动目标进行多普勒误差校正后可以使其在静止场景中精确地成像。针对当前高分辨 SAR 成像中目标出现较大的距离弯曲,本文所述方法的具体操作步骤如下:首先利用二阶广义 Keystone 变换<sup>[9,10]</sup>对包含运动目标的距离压缩后数据进行

距离弯曲校正,然后根据回波包络的斜率进行距离走动校正.对动目标进行多普勒频谱分析,根据运动目标和静止目标的多普勒频率偏移可以得到动目标的径向速度,根据运动目标的多普勒调频率和多普勒频谱宽度可以解出动目标的沿航向速度和径向加速度.而由估计得到运动目标的多普勒中心频率和多普勒调频率构造合适的匹配滤波器进行方位压缩,可以完成对地面运动目标的成像和定位.

## 2 地面运动目标的成像和运动参数估计原理

为了更好地对地面运动目标进行成像和运动参数分析,首先建立运动目标和 SAR 雷达相对运动的几何模型.如图 1 所示, SAR 雷达工作在正侧视方式,载机的速度为  $V$ ,  $v_c$ ,  $v_r$ ,  $a_c$ ,  $a_r$  分别表示地面任意运动点目标  $M$  的沿航向和径向的速度及其加速度.  $R_B$  为雷达平台到该目标的最短距离,  $t_m$  表示方位慢时间.故雷达到运动目标  $M$  的瞬时斜距为:

$$R(t_m) = R_B - v_r t_m + \frac{(V - v_c)^2 - a_r R_B}{2 R_B} t_m^2 \quad (1)$$

若 SAR 雷达发射的信号为线性调频信号,并且假设天线方向图为矩形加权,则去载频后的运动目标  $M$  的接收信号为

$$S_r(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left[\frac{\hat{t} - 2R(t_m)/C}{T_p}\right] \text{rect}\left[\frac{t_m}{L(V - v_c)}\right] \exp\left\{j\left[-\frac{4f_c}{C}R(t_m) + \left(\hat{t} - \frac{2R(t_m)}{C}\right)^2\right]\right\} \quad (2)$$

上式中忽略了自由空间损耗等因素,  $\sigma_0$  为该动目标的散射系数,  $\hat{t}$  为快时间,  $C$  为光速,  $L$  为合成孔径长度,  $f_c$  为发射信号的中心频率,  $f_r$  为线性调频信号的调频率,则式(2)中包络的第一项为距离窗,第二项为方位窗,回波的相位为线性调频信号,对式(2)利用驻相原理<sup>[10]</sup>对快时间做傅立叶变换(FFT)得,

$$S_r(f_r, t_m) = \text{rect}\left[\frac{f_r}{T_p}\right] \text{rect}\left[\frac{t_m}{L(V - v_c)}\right] \exp\left\{j\left[-\frac{4(f_c + f_r)}{C}R(t_m) - \frac{f_r^2}{C}\right]\right\} \quad (3)$$

上式和以下推导中忽略信号的幅度变化.对数据进行距离去斜处理,则式(3)去调频后变为

$$S_r(f_r, t_m) = \text{rect}\left[\frac{f_r}{T_p}\right] \text{rect}\left[\frac{t_m}{L(V - v_c)}\right] \exp\left\{-j\frac{4(f_c + f_r)}{C}R(t_m)\right\} \quad (4)$$

从上式中的相位中可以看出距离和方位是耦合的.把式(1)代入式(4),分析其相位得

$$(f_r, t_m) = -\frac{4(f_c + f_r)}{C}R_B + \frac{4(f_c + f_r)}{C}v_r t_m - \frac{2(f_c + f_r)}{C} \cdot \frac{(V - v_c)^2 - a_r R_B}{R_B} t_m^2 \quad (5)$$

上式中第一项为常数项,它不影响后面的处理;第二项是距离走动项和多普勒偏移项,若已知目标的径向速度,通过距离走动校正和多普勒中心校正可以补偿第二项的影响;第三项为距离弯曲项和多普勒调频项,若已知目标的沿航向速度和径向加速度,可以通过距离弯曲校正和方位匹配滤波完成该项的补偿,然后进行方位压缩即可以成像.但是在大多数情况下,动目标为非合作目标,特别是在混有复杂地杂波的多个动目标的情况下,而且高分辨成像要求目标的相干积累时间比较长,它们的距离弯曲比较严重,距离压缩后的各个目标间的包络相互交织在一起,很难分离和估计出每个动目标的运动参数.但是二阶 Keystone 变换可以完成对盲速目标的距离弯曲校正.若令:

$$t_m = \left(\frac{f_c}{f_r + f_c}\right)^{1/2} m \quad (6)$$

把式(6)代入式(5)可得:

$$(f_r, m) = -\frac{4(f_c + f_r)}{C}R_B + \frac{4}{C}(f_c + f_r)^{1/2}f_c^{1/2}v_r m - \frac{2((V - v_c)^2 - a_r R_B)}{R_B} \frac{2}{m} \quad (7)$$

上式中波长  $\lambda = c/f_c$ ,把上式中  $(f_c + f_r)^{1/2}$  做一阶 Taylor 级数展开,式(7)可表示为

$$(f_r, m) = -\frac{4(f_c + f_r)}{C}R_B + \frac{4}{C}v_r m + \frac{2f_r}{C}v_r m - \frac{2((V - v_c)^2 - a_r R_B)}{R_B} \frac{2}{m} \quad (8)$$

在上式的第四项中只有方位向二次相位信号,耦合的距离弯曲项已经消除,并且在第三项中可以看出经过二阶广义 Keystone 变换后,距离走动减小为原来的一半.然后对数据进行距离压缩,根据该动目标的距离走动轨迹的斜率,可以进行走动校正,即把式(8)代入式(4),消除距离走动量  $2f_r v_r t_m / C$ ,并对式(4)进行反傅立叶变换(IFFT),忽略常数相位的影响可得

$$S_r(\hat{t}, t_m) = \text{sinc}\left[T_p\left(\hat{t} - \frac{2R_B}{C}\right)\right] \text{rect}\left[\frac{t_m}{L(V - v_c)}\right] \exp\left\{j\left[\frac{4v_r}{C}t_m - j\frac{2((V - v_c)^2 - a_r R_B)}{R_B}t_m^2\right]\right\} \quad (9)$$

这时该运动目标距离压缩后的数据就在距离单元  $R_B$  上,沿方位向分布.然后对式(9)做 FFT 变换可得

$$S_r(\hat{t}, f_a) = \text{sinc}\left[T_p\left(\hat{t} - \frac{2R_B}{C}\right)\right] \text{rect}\left[\frac{f_a - f_d}{f_a}\right]$$

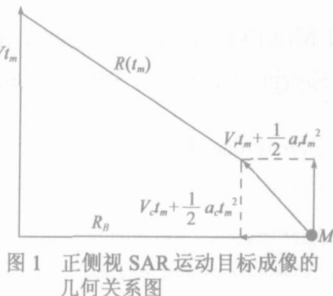


图 1 正侧视 SAR 运动目标成像的几何关系图

$$\exp \left[ -j \frac{(f_a - f_d)^2}{k_a} \right] \quad (10)$$

$$\text{其中:} \quad f_d = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (11)$$

$$k_a = -2 \frac{(V - v_c)^2 - a_r R_B}{R_B} \quad (12)$$

上式中  $f_a$  表示多普勒频率,  $f_d$  为运动目标  $M$  的多普勒带宽. 为了便于分析运动目标的多普勒信息, 有必要先明确一下运动目标的方位向合成孔径长度. 如图 2 所示, 在相

图 2 运动目标的合成孔径示意图

干积累时间内, 载机由点  $P$  运动到点  $P'$ , 运动目标  $M$  由点  $T$  运动得到点  $T'$ , 则称  $PP'$  为动目标  $M$  的绝对合成孔径, 其长度为  $L + L'$ ,  $TT'$  为目标  $M$  的运动距离, 长度为  $L'$ ,  $PP_1$  为(相对)合成孔径, 长度为  $L$ . 这样从图 2 中可以知道: 当载机速度  $V$  和目标  $M$  的沿航向速度  $v_c$  同向时, 绝对合成孔径长度会变长, 动目标在方位向的数据支撑域会变长; 而当载机速度  $V$  和目标  $M$  的沿航向速度  $v_c$  相反时, 绝对合成孔径长度会变短, 动目标在方位向的数据支撑域会变短. 但是不论目标  $M$  的沿航向速度的方向怎样变化, 相对合成孔径  $L$  不会变, 这样保证了动目标和静止场景具有同样的方位向分辨率. 另外由图 2 还知道绝对孔径长度和相对孔径长度的数学关系式为

$$L + L' = \frac{V}{V - v_c} L \quad (13)$$

若已知一个和动目标  $M$  在相同距离单元的强静止目标的方位支撑区长度  $L$  (也可以粗估  $L \approx R_B \cdot 3\text{dB}$ ,  $3\text{dB}$  表示为  $3\text{dB}$  的方位波束角), 并且可以在距离压缩后的数据中估计出该动目标的方位支撑区长度  $L + L'$ , 这样根据式(13)可以粗略估算出动目标的沿航向速度  $v_c$ . 但是根据动目标的多普勒带宽和调频率可得较为精确的沿航向速度  $v_c$ .

$$v_c = V - \frac{L |k_a|}{f_a} \quad (14)$$

由式(14)得到的  $v_c$ , 再代入式(12)的多普勒调频率表达式可以解得径向加速度  $a_r$ ,

$$a_r = \frac{k_a}{2} + \frac{(V - v_c)^2}{R_B} \quad (15)$$

由于式(10)中动目标的方位回波包络在距离徙动校正后在同一个距离单元上, 并且回波的多普勒相位为线性调频信号, 所以利用 Wigner-Ville 分布<sup>[6,11]</sup>可以很容易得到多普勒信号的调频率  $k$ . 并且, 通过对动目标的多普勒信号求模来估计出多普勒谱的偏移量或者对多

普勒信号求相位展开估计出多普勒相位中心的偏移量都可以求出动目标的多普勒中心  $f_d$ , 于是可以先在时域上乘以旋转因子  $\exp(-j2\pi f_d t_m)$ , 让动目标的多普勒中心频率搬移到零频, 则式(10)变为

$$S_r(\hat{t}, f_a) = \text{sinc} \left[ T_p \left( \hat{t} - \frac{2R_B}{C} \right) \right] \text{rect} \left[ \frac{f_a}{f_d} \right] \exp \left[ -j \frac{f_a^2}{k_a} \right] \quad (16)$$

然后构造多普勒匹配滤波参考信号,

$$S_{\text{ref}} = \exp \left[ j \frac{f_a^2}{k_a} \right] \quad (17)$$

利用式(16)和式(17)相乘, 然后做 IFFT 可得式(18), 这样就完成了对运动目标重新定位的精确 SAR 成像.

$$S_r(\hat{t}, t_m) = \text{sinc} \left[ T_p \left( \hat{t} - \frac{2R_B}{C} \right) \right] \text{sinc} \left[ \frac{k_a L}{V - v_c} t_m \right] \quad (18)$$

### 3 SAR 地面运动目标精确成像和运动参数估计的算法流程

如图 3 所示, SAR 原始数据经过距离 FFT 得到距离频域-方位时域的信号, 接着做距离去斜处理, 去掉信号中的距离向二次相位信号; 然后做二阶 Keystone 变换, 再做距离 IFFT 得到距离时域-方位时域的信号, 此时消除了场景回波包络的距离弯曲, 并且距离走动率减小了一半; 然后根据运动目标的轨迹提取出动目标数据, 并由运动目标轨迹的斜率进行距离走动校正. 由于距离走动校正属于包络校正, 其校正精度要求不高 (误差可以在一个距离采样单元以内), 所以根据动目标的运动轨迹校正距离走动是可行的. 这样在完成动目标的距离徙动校正后, 该动目标信号就聚集在某个距离采样单元上, 此时对数据进行 Wigner-Ville 变换, 可以得到该信号时频分布的能量聚集斜线的斜率, 即可得到该动目标信号的多普勒调频率  $k_a$ ; 再对距离徙动校正后的数据做方位 FFT 后, 数据变换到距离时域-方位多普勒域, 然后从信号的幅频特性或者相频特性上可以得到该运动目标的多普勒中心频率  $f_d$  和多普勒带宽  $f_a$ , 然后根据式(11)、式(14)和式(15)求出该运动目标的径向速度  $v_r$ 、沿航向速度  $v_c$  和径向加速度  $a_r$ . 另



图 3 运动目标精确成像和运动参数估计算法的流程图

外,有了运动目标的多普勒中心频率  $f_d$  和多普勒调频率  $k_a$ ,把数据进行多普勒中心校正后,根据式(17)构造出多普勒匹配滤波器的参考函数,对该目标的回波进行方位匹配滤波处理,然而在实测数据处理中为了减小由于受到载体运动误差和杂波干扰的影响,一般还要做 PGA 自聚焦<sup>[12]</sup>处理来消除动目标的高次相位误差.最后做方位 IFFT,即可得到精确定位和聚焦较好的 SAR 图像.

若场景中存在着多个动目标,可以利用循环算法先把能量最大的运动目标的数据提取出来,对其进行上述的运动目标精确成像和运动参数估计操作,然后把该动目标进行保存后置零;再提取出来能量次大的运动目标数据,进行如上操作,一直到把场景中检测到的运动目标完全取完为止.最后可以把运动目标精确成像的结果融合到清晰的 SAR 图像中.

#### 4 仿真数据处理结果及分析

这里仿真了 SAR 在正侧视工作方式下的三个点目标数据,仿真数据参数选择如下:脉冲宽度为  $4\mu\text{s}$ ,波长为  $3\text{cm}$ ,采样频率为  $160\text{MHz}$ ,场景中心为  $12\text{km}$ ,重复频率为  $1000\text{Hz}$ ,发射带宽为  $160\text{MHz}$ ,载体速度为  $100\text{m/s}$ ,波束宽度为  $2.85^\circ$ ,分辨率为  $1\text{m}$ .若把场景认为是二维平面坐标,在场景坐标原点处  $(0,0)$  放置一个静止目标  $S$ ,在  $(0,-5)$  和  $(0,5)$  分别放置运动目标  $M_1$  和  $M_2$ ,其运动参数如表 1 和表 2 中的真值所示.

图 4(a) 是距离压缩后的图像,由于 SAR 成像的分辨率为  $1\text{m}$ ,方位向的相干积累时间较长,故图中的三个目标存在非常明显的距离弯曲,再加上  $M_1$  和  $M_2$  存在径向速度,这样会产生较大的距离走动.所以,在图 4(a) 中三个点目标的距离压缩后轨迹存在部分重叠,这时在时域上很难直接把三个目标进行分离,分别校正其距离徙动.而图 4(b) 是经过二阶 Keystone 变换后的图像,位于图像中间的静止目标  $S$  消除了距离弯曲后其轨迹变为一条直线,而位于两边的动目标  $M_1$  和  $M_2$  在消除距离弯曲后只剩下距离走动,所以其轨迹在图像中为两条斜线,并且从斜线的斜率可以看出它们的距离走动率正如式(8)所示的减小为原来的一半,这样进一步地降低了目标间的数据耦合量,对后续处理比较有利.故由此可见二阶 Keystone 变换能在未知各个目标的运动速度情况下消除场景目标的距离弯曲.另外,根据图 4(b) 中目标  $M_1$  和  $M_2$  轨迹的斜率很容易地消除它们的距离走动,为了使目标间的影响较小,在对运动目标进行走动校正是先把能量最大的运动目标轨迹  $M_1$  的数据取出来,经过走动校正后其目标轨迹为一条水平直线,然后把该轨迹所对应的几个距离单元的数据保存留后置零,接着对包含该运动目标轨迹的数据进

行反距离走动校正,最后把保存的走动校正后数据放在相应的距离单元上,这样使得运动目标走动校正对杂波影响较小.当然也可利用足够长的带宽信号对动目标成像后再消除该动目标距离走动校正对杂波的影响.按照上述步骤对目标  $M_2$  进行类似操作,得到如图 4(c) 所示的结果,图中运动目标的轨迹在距离走动校正后和静止目标的轨迹一样表现为沿方位时间分布的直线,并且图中上面较长的轨迹对应目标  $M_1$ ,因为目标  $M_1$  的沿航向速度与载体速度的方向一致,最下面的较短轨迹对应着目标  $M_2$ ,因为目标  $M_2$  的沿航向速度与载体速度的方向相反.取出部分运动目标数据进行 Wigner-Ville 变换,可以得到如表 1 和表 2 所示的运动目标  $M_1$  和  $M_2$  的多普勒调频率.然后对数据做方位 FFT 得到如图 4(e) 所示的运动目标的多普勒频谱图和如图 4(f) 所示的多普勒相频特性图,图中的实线对应目标  $S$  的特性,点划线对应目标  $M_1$  的特性,虚线对应目标  $M_2$  的特性.从图 4(e) 或者图 4(f) 可以得到表 1 和表 2 所示的多普勒参数(多普勒中心频率  $f_d$ , 带宽  $f_a$ ),此时根据式(17)构造各个目标的方位匹配滤波函数,对不同的距离单元在校正多普勒中心频率后进行方位压缩,可以得到图 4(d) 所示的三个目标的 SAR 图像.然后根据式(11)、式(14)和式(15)求出表 1 和表 2 所示的各个运动目标的径向速度  $v_r$ 、沿航向速度  $v_c$  和径向加速度  $a_r$ .另外,从表 1 和表 2 中可以看出估计得到的运动目标的多普勒参数和运动参数的误差都比较小,估计值比较接近真值,可以对运动目标进行运动状态描述.

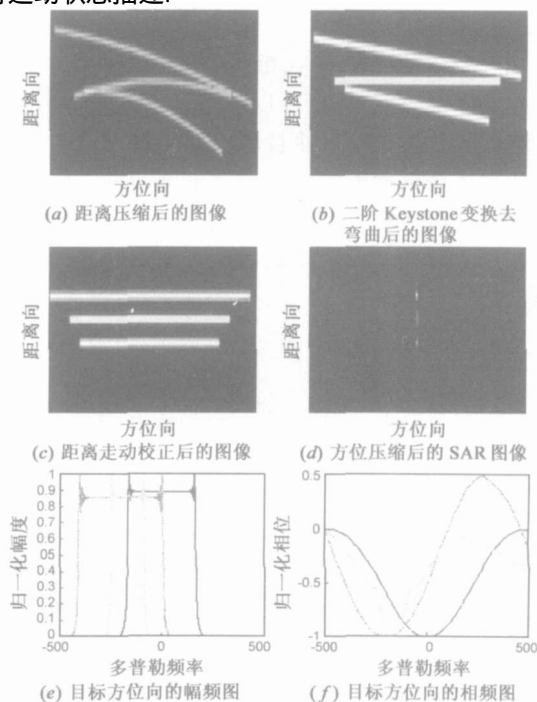


图 4

表 1 运动目标  $M_1$  的参数比较

| 参数比较 | $f_{dk}(\text{Hz})$ | $f_a(\text{Hz})$ | $k_a(\text{Hz/s}^2)$ | $v_r(\text{m/s})$ | $v_c(\text{m/s})$ | $a_r(\text{m/s}^2)$ |
|------|---------------------|------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| 真值   | -166.6667           | 166.6667         | -22.2222             | -2.5000           | 20.0000           | 0.2000              |
| 估计值  | -166.6260           | 165.4800         | -22.3008             | -2.4994           | 19.1414           | 0.2103              |
| 相对误差 | 0.0244 %            | 0.7120 %         | 0.3537 %             | 0.0240 %          | 4.2930 %          | 5.1500 %            |

表 2 运动目标  $M_2$  的参数比较

| 参数比较 | $f_{dk}(\text{Hz})$ | $f_a(\text{Hz})$ | $k_a(\text{Hz/s}^2)$ | $v_r(\text{m/s})$ | $v_c(\text{m/s})$ | $a_r(\text{m/s}^2)$ |
|------|---------------------|------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| 真值   | -200.0000           | 418.1159         | -80.1389             | -3.0000           | -15.0000          | -0.1000             |
| 估计值  | -199.9512           | 419.7795         | -80.6706             | -2.9993           | -15.0302          | -0.1074             |
| 相对误差 | 0.0244 %            | 0.3979 %         | 0.6635 %             | 0.0233 %          | 0.2013 %          | 7.4000 %            |

5 实测数据处理结果

本批数据是单通道 SAR 所录取的,该雷达工作在 X 波段、正侧视,场景中心距离为 12km,载机高度为 5km.该数据的大小为 256 × 32256(距离采样点数 × 方位采样点数).图 5 (a) 是距离压缩后的结果,图中有三

个强目标,记为  $M_1$ 、 $M_2$  和  $M_3$ ,从图 5 (a) 可以看出来目标回波有明显的距离弯曲和走动.图 5 (b) 是利用数据估计出来的多普勒参数进行距离徙动校正的结果,图中  $M_2$  和  $M_3$  消除距离徙动,表现为沿方位分布的一条直线,由此可见  $M_2$  和  $M_3$  为静止目标.而  $M_1$  还有明显的距离徙动,所以可见  $M_1$  很可能为动目标.图 5 (c) 是利用从数据估计出来的多普勒参数粗略成像的结果,该图中  $M_2$  和  $M_3$  在对应的位置聚焦良好,而  $M_1$  不仅存在着明显的散焦和越距离单元徙动,还在方位向有明显的偏移,可见该目标所表现的特性为 SAR 图像中动目标的性质.为了便于观测,对成像结果进行多视处理,并截取了如图 5 (d) 所示的部分 SAR 图像,该图所对应的数据对应的场景为 192m × 1324m.在图 5 (d) 中除了白圈所标示的 A 区中动目标  $M_1$  明显散焦外其它目标聚焦效果良好.

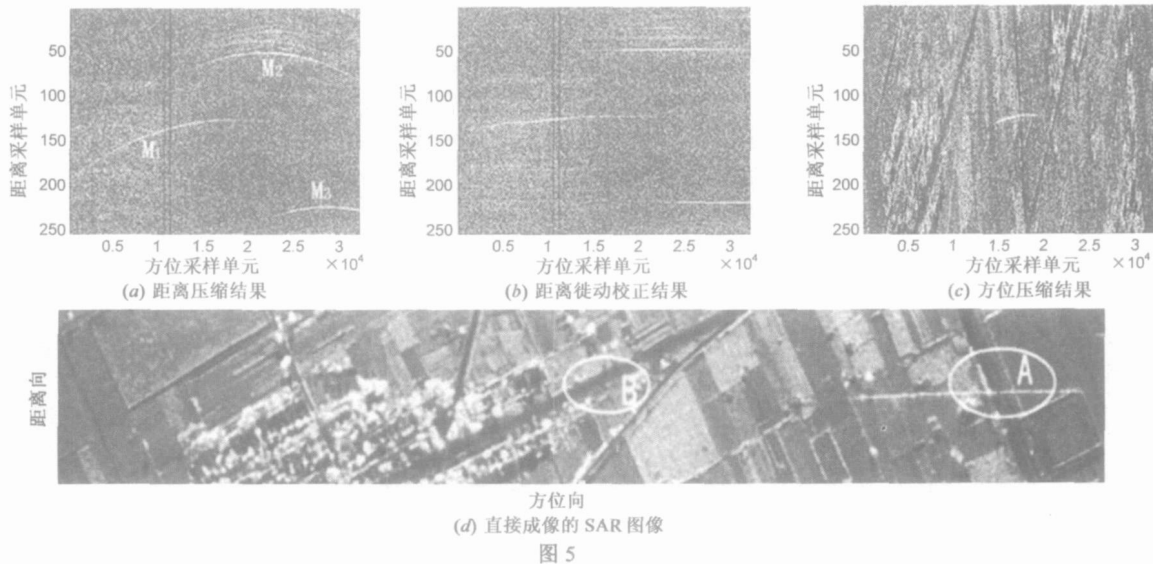


图 5

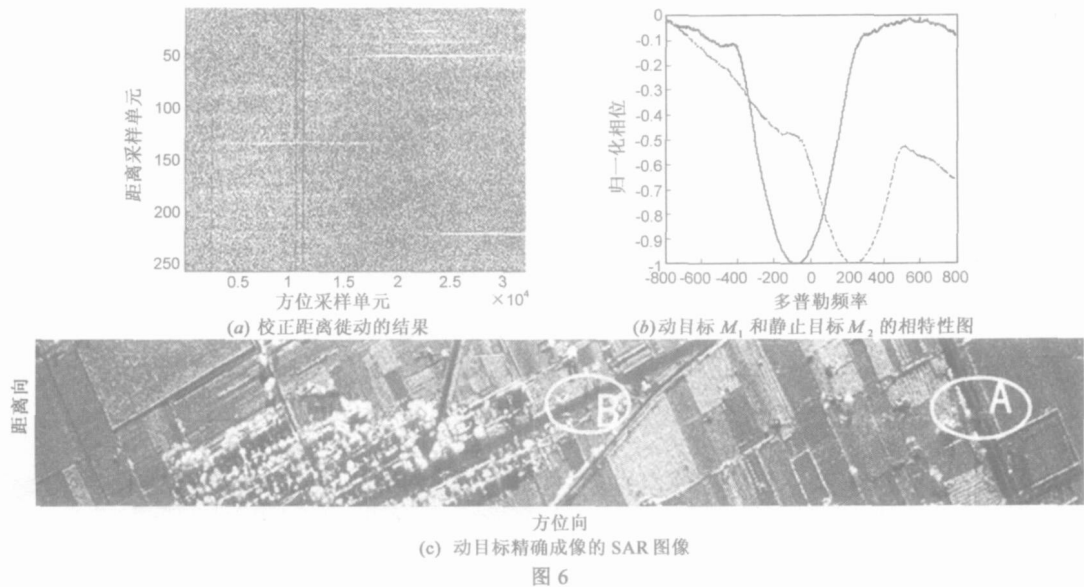


图 6

根据第 3 节所述的算法流程对数据进行处理. 图 6(a) 是先利用二阶 Keystone 变换消除距离弯曲, 再利用目标距离轨迹的斜率校正走动后的结果. 图中  $M_1$ 、 $M_2$  和  $M_3$  都较好地消除距离徙动, 其回波包络表示为沿方位分布的水平直线. 然后取出目标  $M_1$  和  $M_2$  所对应的数据做方位向傅立叶变换并进行相位展开得到图 6(b) 所示的相频特性图, 图中的实线对应静止目标  $M_2$  的相频特性, 虚线对应着动目标  $M_1$  的相频特性. 从图 6(b) 中可以看出动目标  $M_1$  的中心频率为 238Hz, 静止目标  $M_2$  的中心频率为 -76Hz, 所以该动目标的径向速度为 4.91m/s, 若不校正目标  $M_1$  的径向速度所引起的多普勒偏移, 将会造成该目标在 SAR 图像中沿方位向存在严重的位置偏移 (约为 520m). 同时, 在图 6(b) 中可看出静止目标的多普勒带宽为 699.03Hz, 动目标  $M_1$  的多普勒带宽为 602.69Hz, 由 Wigner-Ville 变换可以得到静止目标和动目标的多普勒调频率分别为 -64.30Hz/s 和 -43.70Hz/s, 而此刻载机速度为 113.49m/s<sup>2</sup>. 根据式 (14) 和式 (15) 估计得到动目标  $M_1$  的沿航向速度为 13.78m/s, 其径向加速度为 -0.16m/s<sup>2</sup>. 利用静止目标和动目标的参数分别成像, 并把动目标的成像结果融合到静止场景图像中可得如图 6(c) 所示的 SAR 图像, 与图 5(c) 比较, 在图 6(c) A 区中的公路上没有了散焦的动目标  $M_1$ , 在多普勒偏移校正后根据式 (17) 所示的多普勒匹配滤波器对该目标进行精确地成像, 运动目标  $M_1$  在图 6(c) B 区域的公路上聚焦良好地重现了.

## 6 结束语

针对单通道高分辨 SAR 系统中地面运动目标成像与参数估计的问题, 本文利用二阶 Keystone 变换进行距离弯曲校正, 再利用估计出的走动率进行距离走动校正, 然后对运动目标进行多普勒参数和运动参数估计, 最后把运动目标的成像结果标注在 SAR 图像中.

致谢 感谢中国电子科技集团第 14 研究所提供实测数据.

## 参考文献:

- [1] E F Stockburger, D N Held. Interferometric moving ground target imaging [A]. IEEE International Radar Conference [C]. US:IEEE, 1995. 438 - 443.
- [2] L Lightstone, D Faubert, G Rempel. Multiple phase centre DP-CA for airborne radar [A]. Proceedings of the 1991 IEEE National Radar Conference [C]. US:IEEE, 1991. 36 - 40.
- [3] 保铮, 张玉洪, 廖桂生, 王永良, 吴仁彪. 机载空时二维信号处理 [J]. 现代雷达. 1994, 16(1): 38 - 48.
- [4] Jose M B Dias, Paulo A C Marques. Multiple moving target detection and trajectory estimation using a single SAR sensor [J]. IEEE Trans. on AES. 2003, 39(2): 604 - 624.
- [5] S Barbarossa, et al. Space-time-frequency processing of synthetic aperture radar signal [J]. IEEE Trans on AES, 1994, 30(2): 341 - 358.
- [6] 孙泓波, 顾红, 苏卫民, 刘国岁. 基于互 Wigner-ville 分布的 SAR 运动目标检测 [J]. 电子学报. 2002, 30(3): 348 - 350. SUN Hong-bo, GU Hong, SU Wei-min, LIU Guo-sui, SAR moving targets detection based on cross wigner-ville distribution [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(3): 348 - 350. (in Chinese)
- [7] 盛蔚, 毛士艺. 一种合成孔径雷达对地面运动目标成像和精确定位方法 [J]. 电子与信息学报, 2004, 26(4): 598 - 605.
- [8] R P Perry, R C Dipietro, R L Fante. SAR imaging of moving targets [J]. IEEE Trans on AES, 1999, 35(1): 188 - 200.
- [9] 邢孟道, 保铮, 郑义明, 冯大政. 适合于大型平稳和机动目标的成像算法 [J]. 信号处理, 2001, 17(1): 47 - 55.
- [10] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [11] 张贤达. 现代信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [12] D E Wahl, P H Eichel, D C Ghiglia, C V Jr Jakowatz. Phase gradient autofocus — A robust tool for high resolution SAR phase correction [J]. IEEE Trans on AES, 1994, 30(3): 827 - 834.

## 作者简介:



周 峰 男, 1980 年 1 月生于河南省通许县, 2005 年 6 月在西安电子科技大学获工学硕士学位, 现为雷达信号处理国家重点实验室博士生, 主要研究方向为雷达成像、运动目标检测和 SAR 干扰研究.

E-mail: fzhou@mail.xidian.edu.cn



李亚超 男, 1981 年 5 月出生于江西南昌人, 2005 年 6 月在西安电子科技大学获工学硕士学位, 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室博士生, 研究方向: ISAR 成像、SAR 干扰研究和运动目标检测.



邢孟道 男, 1975 年 11 月出生于浙江, 1997 年 7 月在西安电子科技大学工程学院获工学学士学位, 同年免试推荐为本校雷达信号处理国家重点实验室硕博连读生, 2002 年 5 月获西安电子科技大学信号与信息处理专业工学博士学位, 现为西安电子科技大学教授. 发表论文 40 余篇, 承担课题十余项. 主要研究方向为雷达成像、目标识别和天波超视距雷达信号处理.

E-mail: xmd@mail.xidian.edu.cn