

# 临近空间慢速平台SAR地面动目标检测与成像

杨海光, 易青颖, 李中余, 武俊杰, 黄钰林, 杨建宇

(电子科技大学电子工程学院 成都 611731)

**【摘要】**临近空间慢速平台SAR具有生存能力强、持续工作时间长、机动性能好等特点。该文提出了一种临近空间慢速平台SAR地面动目标检测与成像方法。由于平台运动速度较慢,地面静止杂波多普勒展宽较窄,有利于将地面杂波与动目标回波进行分离。首先利用多普勒滤波器实现地面动目标回波与静止杂波的分离,提取出动目标回波;然后将一阶Keystone变换与变分辨多普勒调频率估计方法相结合,在动目标速度未知的情况下完成距离走动校正和距离弯曲校正,解决了动目标回波距离徙动校正难的问题。利用估计出的多普勒调频率设计出方位压缩函数进行方位聚焦,从而完成动目标的检测与成像。该方法不仅适用于地面慢速运动目标,同时也适用于快速运动目标。计算机仿真验证了该方法的有效性。

**关键词** 多普勒滤波; 多普勒调频率估计; Keystone变换; 临近空间慢速平台SAR地面动目标成像  
**中图分类号** TN958 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.06.008

## Near-Space Slow SAR Ground Moving Target Detection and Imaging

YANG Hai-guang, YI Qing-ying, LI Zhong-yu, WU Jun-jie, HUANG Yu-lin, and YANG Jian-yu

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

**Abstract** Near-space slow SAR (NSS-SAR) has several advantages such as robust survivability, persistence and flexible maneuvering performance. This paper proposes a NSS-SAR ground moving target detection and imaging method. Since the platform has a slow speed, it is beneficial to separate ground static clutter and ground moving target echo separation. First, Doppler filter is used to separate the spectrum of ground moving target echo from the spectrum of static clutter. After the echo of ground moving target is extracted, first-order Keystone transform and Doppler rate estimation method are combined to accomplish range walk correction and range curvature correction, though motion parameters of ground moving target are unknown. Thus, it provides an approach to solving the difficult problem of correcting range migration of moving target echo. Then, the estimated Doppler rate is used to design azimuth compression function to achieve azimuth focusing. The proposed method is not only suitable for ground slow-moving targets but also fast-moving targets. Computer simulations verify the effectiveness of this method.

**Key words** Doppler filtering; Doppler frequency estimation; keystone transform; near-space slow SAR ground moving target imaging

动目标检测与成像在军用及民用领域中具有非常重要的意义。然而传统星载合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)和机载SAR平台速度较快,地面静止杂波谱较宽,地面动目标通常被淹没在静止杂波中,造成动静杂波分离困难,很难检测到地面动目标。目前在星载SAR和机载SAR系统中,通常使用偏置相位中心天线、空时自适应处理来进行杂波对消<sup>[1-3]</sup>。然而这些方法都需要阵列天线以及联合空时处理,对于硬件设计和信号处理的要求都很高。

临近空间指位于距离地面20~100 km<sup>[4]</sup>,介于

传统航空器活动空间和航天器运行空间之间的新空域。临近空间飞行器的速度可以从0~1 500 m/s<sup>[5]</sup>。临近空间的高度特性及气流特性使得临近空间SAR具备了许多突出的特点和优点,如生存能力强、机动性能好、持续工作时间长、成像场景大等。临近空间慢速平台SAR(NSS-SAR)是指平台速度为0~30 m/s的临近空间SAR。在SAR成像中,地面杂波的多普勒带宽与平台速度成正比。NSS-SAR平台运动速度慢,地面静止杂波多普勒展宽较窄,有利于动目标回波与静止杂波的分离,因而NSS-SAR对于动地面目标检测非常有利。

收稿日期: 2013-05-28; 修回日期: 2014-09-23

基金项目: 部级预研基金

作者简介: 杨海光(1978-),男,博士生,主要从事合成孔径雷达成像方面的研究。

目前对临近空间SAR的研究集中在临近空间快速平台SAR大场景、高分辨成像上<sup>[5-6]</sup>, 对慢速平台SAR研究较少, 仅在文献[7-8]中给出了一些关于临近空间慢速平台的介绍或是临近空间慢速平台用于通信方面的研究, 但均未涉及该类平台SAR动目标检测与成像的研究。

针对以上问题, 本文提出了一种临近空间慢速平台SAR地面动目标检测与成像方法。该方法在多普勒域设计出多普勒滤波器实现地面动目标回波与静止杂波的分离, 解决了SAR在地面动目标成像中动静杂波分离难的问题。动静杂波分离并完成动目标检测后, 提取出动目标回波。在现有文献中, 采用一阶Keystone变换<sup>[9]</sup>或二阶Keystone变换<sup>[10]</sup>只能校正运动目标的距离走动或距离弯曲, 而不能对二者同时进行校正。本文首先利用一阶Keystone变换完成动目标的距离走动校正, 之后提出一种变分辨多普勒调频率估计方法, 利用距离弯曲与多普勒调频率之间的关系, 在地面动目标速度未知的情况下完成距离弯曲校正, 解决了动目标回波距离徙动校正难的问题。利用估计出的多普勒调频率设计出方位压缩函数进行方位聚焦, 从而完成地面动目标的检测与成像。本文提出的方法不仅能够对地面慢速运动目标进行检测和成像, 还适用于快速运动目标的检测与成像。

## 1 NSS-SAR动目标检测与成像

### 1.1 NSS-SAR信号模型

NSS-SAR成像几何构型如图1所示。三维坐标系中,  $xy$  平面代表地球表面,  $z$  轴垂直于地面。设动目标  $P$  初始位置为坐标系原点, 其运动矢量为  $v_p$ , 在距离向和方位向上的分量分别为  $v_{px}$ 、 $v_{py}$ 。

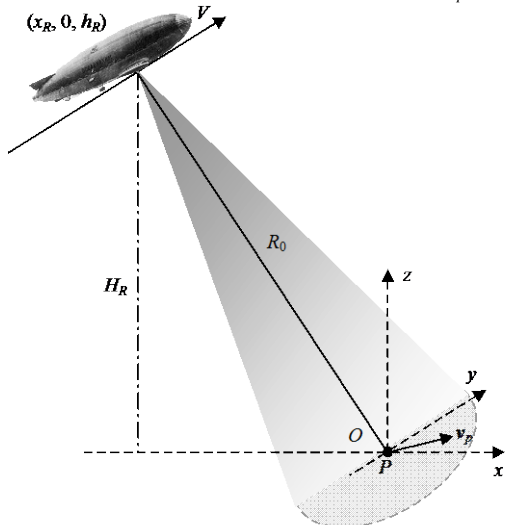


图1 NSS-SAR几何构型

平台以速度  $V$  沿  $y$  轴飞行, 平台速度通常为  $0 \sim 30$  m/s。为简化分析, 假设系统工作于正侧视模式。平台初始坐标设为  $(x_R, 0, h_R)$ , 高度  $h_R > 20$  km, 其中  $x_R$ 、 $0$  和  $h_R$  分别为平台的  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴坐标。零时刻波束中心指向场景坐标系原点处。

目标  $P$  到平台的距离历史为:

$$R(t) = \sqrt{h_R^2 + [(V - v_{py})t]^2 + (x_R + v_{px}t)^2} \approx R_0 + \frac{[(V - v_{py})^2 + v_{px}^2]t^2}{2R_0} + \frac{x_R v_{px} t}{R_0} \quad (1)$$

式中,  $R_0$  为平台到目标  $P$  的初始最短斜距;  $t$  为方位向慢时间变量。

假设发射信号为线性调频信号, 表达式为:

$$s(\tau) = \text{rect}\left(\frac{\tau}{T_p}\right) \exp\{j2\pi f_0 \tau + j\pi K_r \tau^2\} \quad (2)$$

式中,  $f_0$  为载频;  $T_p$  为脉冲宽度;  $\tau$  为距离向快时间变量。动目标回波信号经解调至基带后记为:

$$S(t, \tau) = \sigma_p s\left[\tau - \frac{2R(t)}{c}\right] \omega\left[\frac{t}{T_s}\right] \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} R(t)\right] \quad (3)$$

式中,  $\sigma_p$  为动目标  $P$  的后向散射系数;  $c$  为光速;  $\omega[\cdot]$  为方位时间窗;  $\lambda$  为载波波长;  $T_s$  为合成孔径时间。本文讨论的NSS-SAR平台速度设为  $30$  m/s, 天线波束宽度为  $2^\circ$ , 中心斜距  $R_0$  为  $25$  km, 则可由  $T_s \approx \theta R_0 / V$  计算出合成孔径时间  $T_s$  大约为  $30$  s。

设静止成像场景为  $\Omega_s$ , 场景回波信号经解调至基带后, 可表示为:

$$S_s(t, \tau) = \iint_{\Omega_s} \sigma(x, y) \text{rect}\left[\frac{\tau - \tau_d(t; x, y)}{T_p}\right] \omega\left[\frac{t - t_d(y)}{T_s}\right] \times \exp\left\{j\pi K_r \left[\tau - \frac{2R(t; x, y)}{c}\right]^2\right\} \times \exp\left\{-j\frac{4\pi R(t; x, y)}{\lambda}\right\} dx dy \quad (4)$$

式中,  $\sigma(x, y)$  为成像场景中任意点目标  $P(x, y)$  的后向散射系数;  $\tau_d(t; x, y)$  为此点目标的距离时延迟;  $t_d(y)$  为此点目标的方位时延;  $R(t; x, y)$  为SAR平台到此目标的距离历史。

回波多普勒相位为  $\frac{4\pi}{\lambda} R(t)$ , 对方位时间变量  $t$  求导, 可以得到方位多普勒频率  $f_d$ :

$$f_d = -j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{1}{2\pi} \frac{dR(t)}{dt} = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR(t)}{dt} = -\frac{2}{\lambda} \left\{ \frac{x_R v_{px}}{R_0} + \frac{t}{R_0} [(V - v_{py})^2 + v_{px}^2] \right\} \quad (5)$$

对于静止目标,  $v_{px} = v_{py} = 0$ , 多普勒调频率为

$$f_{drs} = -\frac{2V^2}{\lambda R_0}。$$

对于动目标  $P$ , 多普勒质心为:

$$f_{dcm} = -\frac{2x_R v_{px}}{\lambda R_0} \quad (6)$$

多普勒调频率为:

$$f_{drm} = -\frac{2[(V - v_{py})^2 + v_{px}^2]}{\lambda R_0} \quad (7)$$

则可得静止杂波多普勒带宽为:

$$B_{a\max} = T_s f_{drs\max} = \frac{2V^2 T_s}{\lambda R_{\min}} \quad (8)$$

为了从静止杂波中提取出地面动目标回波, 动目标多普勒质心应满足不等式:

$$f_{dcm} = \frac{2x_R |v_{px}|}{\lambda R_0} > \frac{2V^2 T_s}{\lambda R_{\min}} \quad (9)$$

式中,  $R_{\min}$  为临近空间平台到目标区域的最短斜距。则动目标的速度应满足:

$$|v_{px}| > \left| \frac{R_0 V^2 T_s}{x_R R_{\min}} \right| \quad (10)$$

对于NSS-SAR, 当  $V < 30$  m/s,  $R_{\min} > 30$  km, 可得  $v_{px} > 1$  m/s, 即只要动目标距离向速度  $v_{px} > 1$  m/s, 可在频域中分离出动静回波。通常, 人的正常步行速度为3 m/s, 对于装甲车、缓慢入港的船只、晃动的树木等慢速动目标或微动目标, 其速度仅有每秒几米甚至小于1 m/s, 而  $v_{px}$  速度可以近似于在正常风速情况下树木的摆动程度。然而传统的星载和机载SAR平台速度很大, 地面动目标回波通常淹没在静止杂波中, 很难检测出慢速动目标。对于机载SAR,  $v_{px}$  通常大于50 m/s; 对于星载SAR,  $v_{px}$  通常大于30 m/s。本文提出的NSS-SAR模型中的慢速平台, 其平台速度慢, 地面静止杂波多普勒展宽较窄, 对于地面慢速动目标检测非常有利。

以上分析证明了NSS-SAR模型具有地面动目标检测及成像能力, 能在单通道情况下多普勒域将地面动目标频谱从静止杂波频谱中提取出来。

## 1.2 动目标检测与成像

本文提出的NSS-SAR地面动目标检测与成像, 其处理流程如图2所示, 主要包含多普勒滤波、多普勒模糊抑制、一阶Keystone变换、变分辨多普勒调频率估计及方位压缩等步骤。

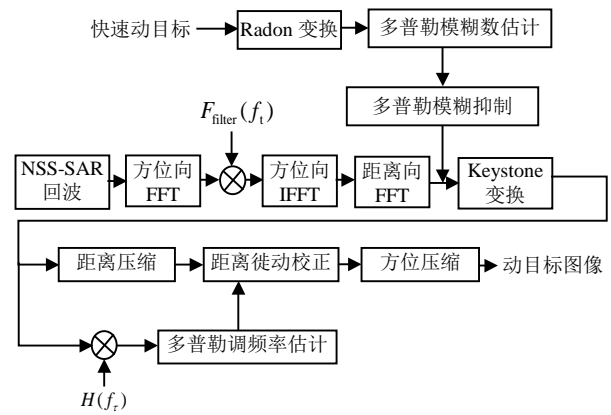


图2 NSS-SAR地面动目标检测与成像流程图

### 1.2.1 多普勒滤波

首先对目标回波作方位向傅里叶变换, 将其变换到距离多普勒域, 表达式为:

$$S(f_t, \tau) = \iint_{\Omega} \sigma(x, y) \text{rect} \left[ \frac{\tau - \tau_d(f_t; x, y)}{T_p} \right] \times W \left[ \frac{f_t - f_{dc}(x, y)}{B_a(x, y)} \right] \exp\{j\theta_{rd}\} dx dy \quad (11)$$

式中,  $f_t$  为方位向频率变量。距离多普勒频谱相位  $\theta_{rd}$  为:

$$\theta_{rd} \approx \frac{\pi f_t^2}{f_{dr}} + \pi K_t \left[ \tau - \frac{2R(f_t; x, y)}{c} \right]^2 - \frac{4\pi R_0(x, y)}{\lambda} \quad (12)$$

设计一个多普勒滤波器, 其阻带为  $-B_{a\max}/2 \sim B_{a\max}/2$ , 即:

$$F_{\text{filter}}(f_t) = \begin{cases} 1 & f_t > B_{a\max}/2, f_t < -B_{a\max}/2 \\ 0 & -B_{a\max}/2 < f_t < B_{a\max}/2 \end{cases} \quad (13)$$

将NSS-SAR回波在距离多普勒频域通过滤波器后, 静止杂波被抑制掉, 提取出动目标回波。经过方位向傅里叶反变换, 得到动目标时域回波, 再将回波作距离向傅里叶变换, 可得距离频域、方位时域回波表达式:

$$S(t, f_r) = s(f_r) \sigma_p \exp\{j(4\pi/c)(f_r + f_0)R(t)\} \quad (14)$$

式中,  $s(f_r)$  为发射信号  $s(\tau)$  的傅里叶变换表达式;  $f_r$  为距离向频率变量。

### 1.2.2 一阶Keystone变换

将动目标回波距离历史  $R(t)$  泰勒展开, 可得:

$$R(t) \approx R_0 + R_0' t + \frac{1}{2} R_0'' t^2 \quad (15)$$

式中,  $R_0' = x_R v_{px} / R_0$ ;  $R_0'' = [(V - v_{py})^2 + v_{px}^2] / R_0$ ; 均与动目标参数有关。而在实际中, 动目标参数是未知的, 从而给距离走动校正和方位压缩带来困难。因此, 本文采用一阶Keystone变换<sup>[9]</sup>来首先完成距离走动校正。

Keystone变换关系为:

$$t = [f_0 / (f_r + f_0)] t_k \quad (16)$$

式中,  $t_k$  为Keystone变换后的方位向时间变量。经变换后, 式(14)变为:

$$S(t_k, f_r) = s(f_r) \sigma_p \exp \left\{ \begin{array}{l} j \frac{4\pi}{c} (f_r + f_0) R_0 + \\ j \frac{4\pi}{c} \tilde{R}_0 f_0 t_k + j \frac{2\pi}{c} \frac{\tilde{R}_0 t_k^2}{(f_r + f_0)} \end{array} \right\} \quad (17)$$

由此可见, 在平台与动目标运动参数未知的情况下, 线性距离走动耦合效应已被消除, 即完成了距离走动校正。然而二次项中还残余耦合效应, 即距离弯曲项还未消除。

### 1.2.3 多普勒模糊抑制

对于地面慢速动目标, 直接对其回波进行一阶Keystone变换就能完成距离走动校正。然而对于快速动目标, 由于NSS-SAR系统中采用较低的PRF进行采样, 当目标速度达到一定值时, 多普勒频率超出 $[-\text{PRF}/2, \text{PRF}/2]$ 范围, 从而产生多普勒模糊。此时, 多普勒质心为 $f_{dc} = f'_{dc} + M_{amb} \text{PRF}$ , 其中,  $f_{dc}$ 为绝对多普勒质心,  $f'_{dc}$ 为PRF的小数部分, 称为基带多普勒质心,  $M_{amb}$ 为多普勒模糊数。为了完成距离走动校正, 在Keystone变换之前必须进行多普勒模糊抑制。

本文采用Radon变换进行多普勒模糊数估计。首先对NSS-SAR提取出的地面动目标回波 $S(t, \tau)$ 进行距离压缩, 将距离压缩后的数据进行Radon变换, 估计出目标轨迹的斜率 $k$ , 则可求得多普勒质心 $\hat{f}_{dc}$ 的估计值为:

$$\hat{f}_{dc} = -\frac{V_R k \frac{\Delta r}{\lambda}}{\Delta l} \quad (18)$$

式中,  $\Delta r$ 表示距离向采样间隔;  $\Delta l$ 表示方位向采样间隔, 则可得多普勒模糊数的估计为:

$$\hat{M}_{amb} = \text{round}(\hat{f}_{dc} / \text{PRF}) \quad (19)$$

构造多普勒模糊抑制函数为:

$$H = \exp \left[ j 2\pi \hat{M}_{amb} \text{PRF} \frac{f_r + f_0}{f_0} \right] \quad (20)$$

将 $S(t, f_r)$ 与 $H$ 相乘, 则可以消去多普勒模糊, 消去多普勒模糊后的动目标距离频域、方位时域回波记为:

$$S_B(t, f_r) = s(f_r) \sigma_p \times \exp \left\{ j \frac{4\pi}{c} (f_r + f_0) \left[ R_0 + \tilde{R}'_0 t + \frac{1}{2} \tilde{R}_0 t^2 \right] \right\} \quad (21)$$

式中,  $\tilde{R}'_0$ 为去掉多普勒模糊后的残余距离展开一次项。由此, 完成了快速动目标的距离走动校正。

### 1.2.4 变分辨多普勒调频率估计

本文将利用变分辨多普勒调频率估计来完成距离弯曲校正。首先对Keystone变换后的动目标回波进行低分辨距离压缩, 压缩函数为:

$$H(f_r) = \text{rect}[f_r / B_{\tilde{r}}] \exp\{j(\pi f_r^2 / K_r)\} \quad (22)$$

式中,  $B_{\tilde{r}}$ 为压缩函数的多普勒带宽,  $B_{\tilde{r}} < K_r T_p$ 。

低分辨距离压缩后, 动目标回波能量大部分聚集在同一距离单元, 记该距离单元数据为 $x(t)$ , 对该距离单元数据采用基于时间-调频率分布<sup>[11]</sup>的方法来进行多普勒调率估计, 首先对 $x(t)$ 做如下变换:

$$C(t, \mu) = \int_0^{\infty} x(t + \tau) x(t - \tau) e^{-j2\pi\mu\tau^2} d\tau \quad (23)$$

式中,  $\mu$ 为调频率变量。

对于任意时刻 $t$ , 都有当 $u = K_r$  ( $K_r$ 为动目标回波的方位调频率)时,  $C(t, u)$ 具有极大值, 则可根据 $C(t, u)$ 的最大值估计出动目标回波的方位调频率 $K_r$ 。利用估计出的方位调频斜率 $K_r$ 可求得距离弯曲量为 $R_{cur} = \lambda K_r t^2 / 4$ , 则对距离压缩后的动目标回波在距离频域乘以距离弯曲校正函数可完成距离弯曲校正, 距离弯曲校正函数为:

$$R_{CMC} = \exp \left\{ j 4\pi \frac{R_{cur}}{c} f_r \right\} \quad (24)$$

距离弯曲校正后的动目标回波数据记为 $S_{R_{CMC}}(t_k, \tau)$ 。经过补偿, 参与的距离弯曲项被完全消除, 完成了距离徙动校正。

利用多普勒调频率估计值 $K_r$ , 构造方位压缩函数, 方位压缩函数为:

$$H_{azi} = \exp\{j\pi(f_k^2 / K_r)\} \quad (25)$$

式中,  $f_k$ 为方位多普勒频率变量。

对 $S_{R_{CMC}}(t_k, \tau)$ 进行方位傅里叶变换, 得到方位频域、距离时域数据 $S_{R_{CMC}}(f_k, \tau)$ , 将 $S_{R_{CMC}}(f_k, \tau)$ 与方位压缩函数 $H_{azi}$ 相乘, 在进行方位向傅里叶逆变换, 最终得到聚焦的动目标图像为:

$$S_p = \text{IFFT}[S_{R_{CMC}}(f_k, \tau) H_{azi}] \quad (26)$$

## 2 计算机仿真与分析

为了验证本文提出的临近空间慢速平台SAR动目标检测与成像方法, 设置两组仿真, 分别对地面慢速动目标与快速动目标进行仿真。雷达仿真参数: 载频9.6 GHz, 发射信号带宽300 MHz, 脉冲重复

频率 500 Hz。NSS-SAR 平台初始时刻坐标为 (-34.6, 0, 20) km。

为了突出NSS-SAR模型的地面动目标检测与成像能力,在地面场景中设置9个点目标,如图3所示,其中P点为动目标,其他点均为静止目标。平台沿y轴运动。相邻两目标间x轴间距为100 m, y轴间距为50 m。

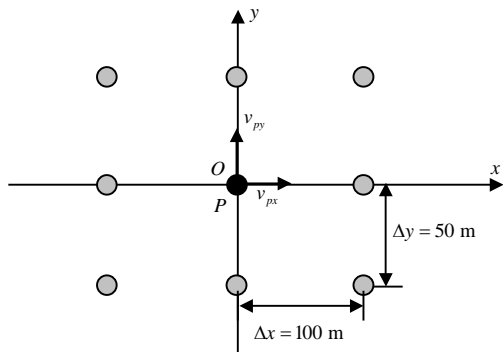
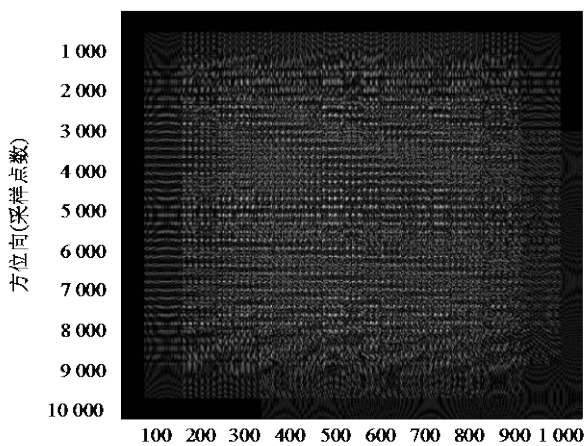
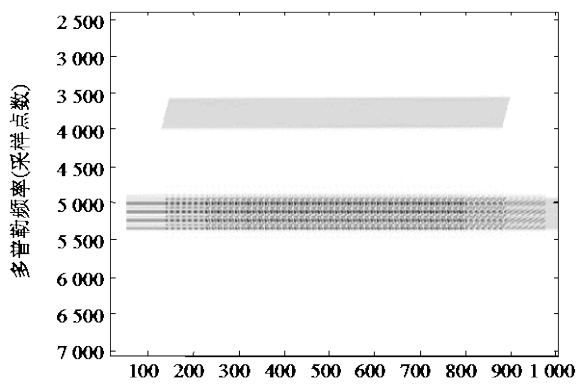


图3 仿真目标场景图

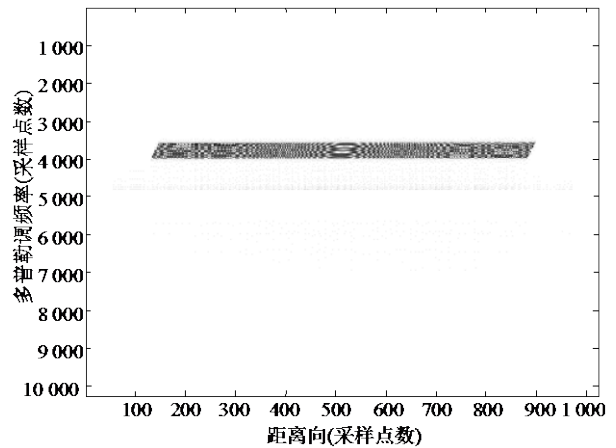
对于慢速动目标仿真,目标P沿距离向速度分量设为1.2 m/s,沿方位向速度分量设为2 m/s,仿真结果如图4所示。



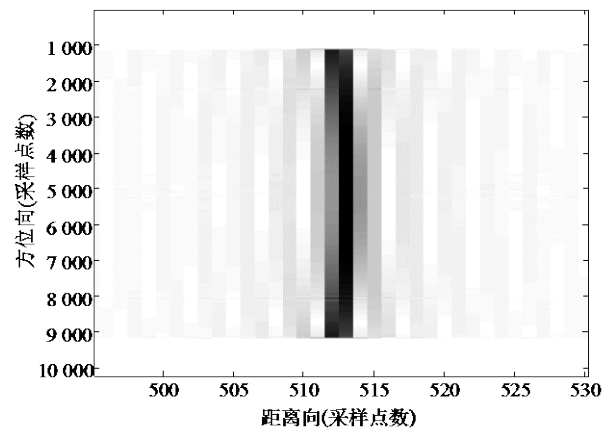
a. 时域回波



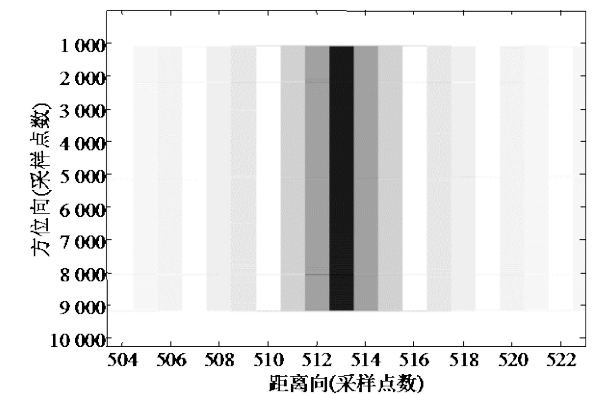
b. 距离多普勒域回波



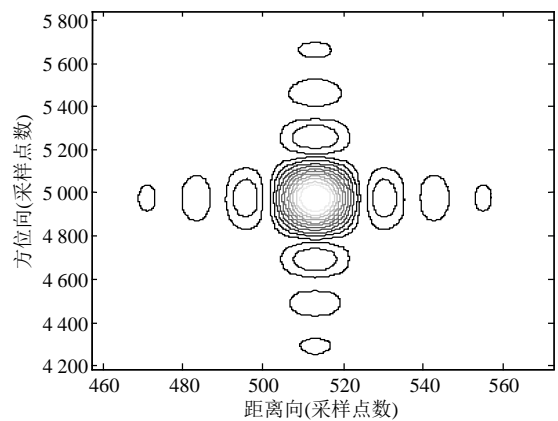
c. 动目标距离多普勒域回波



d. keystone 变换后处理结果



e. 距离弯曲校正结果



f. 方位压缩成像结果

图4 慢速动目标仿真结果

从图4b中可得知, 在NSS-SAR模型中, 地面慢速动目标回波在距离多普勒域能够明显地从静止杂波中分离出来, 而在传统星载与机载SAR系统中, 慢速动目标很难被检测到。图4c为将回波通过多普勒滤波器后得到动目标回波。图4d是动目标回波经过一阶Keystone变换处理后的结果, 在动目标运动参数未知的情况下, 去除了线性距离走动, 然而二次项中还残余耦合效应即距离弯曲。图4e为经过距离弯曲校正处理后的结果, 通过变分辨多普勒调频率估计和低带宽距离压缩, 回波能量已经很好地聚集在同一距离单元内, 完成了距离徙动校正。图4f为慢速动目标最终成像结果, 其峰值旁瓣比(PSLR)为-13.27 dB, 积分旁瓣比(ISLR)为-10.24 dB。

对于快速动目标仿真, 目标  $P$  沿距离向速度分量设为 15 m/s, 沿方位向速度分量设为 5 m/s。仿真结果如图5所示。

图5e为经过距离弯曲校正处理后的结果, 回波能量已经很好地聚集在同一距离单元内, 完成了距离徙动校正。图5f为快速动目标最终成像结果, 其峰值旁瓣比(PSLR)为-13.5 dB, 积分旁瓣比(ISLR)为-10.46 dB。

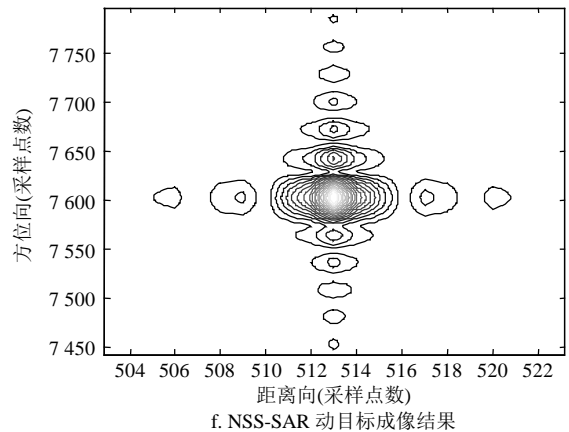
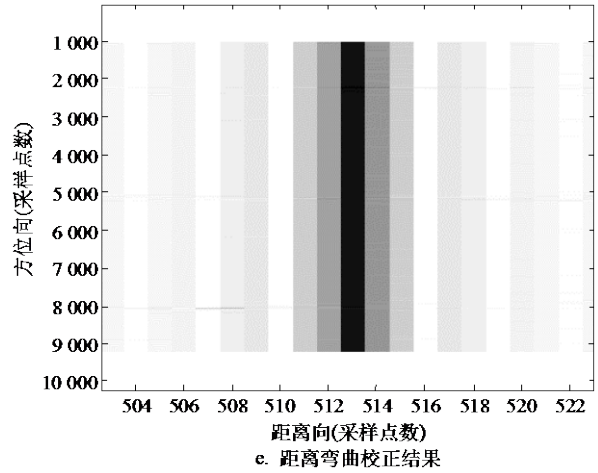
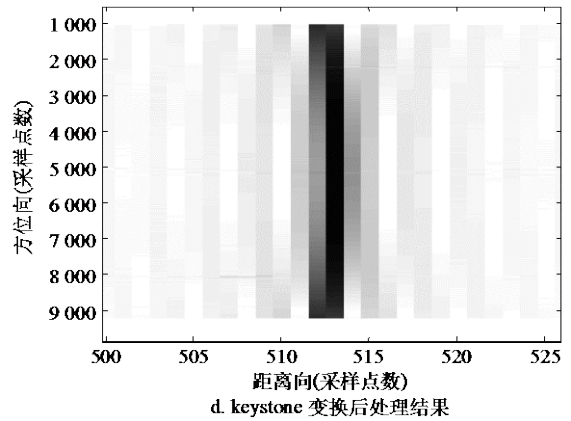
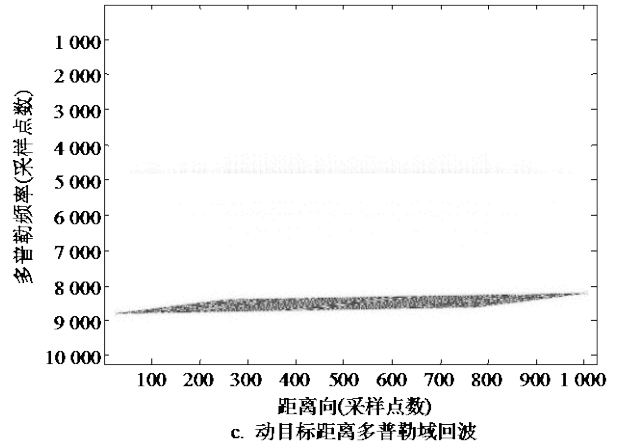
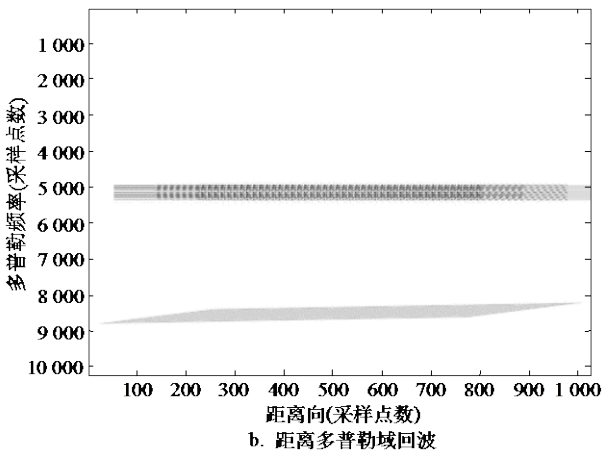
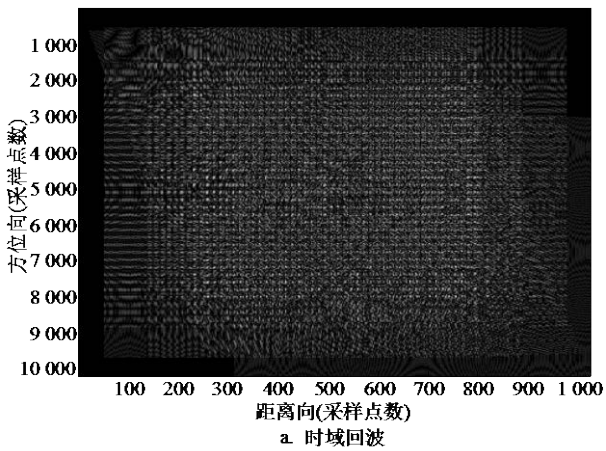


图5 快速动目标仿真结果

### 3 结 论

针对临近空间SAR在地面动目标检测与成像领域的空白、传统星载与机载SAR动目标成像难及无法检测地面慢速动目标的问题,本文利用临近空间慢速平台SAR平台速度慢、地面静止杂波多普勒展宽较窄的特点,在多普勒域设计出多普勒滤波器实现了地面动目标回波与静止杂波的分离。动静杂波分离并完成动目标检测后,提取出动目标回波,将一阶Keystone变换与变分辨多普勒调频率估计方法相结合,在动目标速度未知的情况下完成距离走动和距离弯曲校正,最终进行方位压缩完成成像。该方法不仅能够对地面慢速动目标进行检测和成像,还适用于快速动目标的检测与成像。此外,该方法仅需要单通道就可以完成地面动目标检测与成像。

#### 参 考 文 献

- [1] BRENNAN L E, REED I S. Theory of adaptive radar[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1973, AES-9: 237-252.
- [2] KLEMM R. Space-time adaptive processing: principle and applications[M]. London, U. K.: Institution of Electrical Engineers, 1998.
- [3] WARD J. Space-time adaptive processing for airborne radar[EB/OL]. [1994-10-13]. <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA293032>.
- [4] ALLEN E H. The case for near-space[J]. Aerosp Amer, 2006, 44(2): 31-34.
- [5] WANG Wen-qin. Near-space vehicle-borne SAR with reflector antenna for high-resolution and wide-swath remote sensing[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions, 2012, 50(2): 338-348.
- [6] WANG Wen-qin, PENG Qi-cong, CAI Jing-ye. Waveform-diversity-based millimeter-wave UAV SAR remote sensing[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions, 2009, 47(3): 691-700.
- [7] TOMME E B. Balloons in today's military: An introduction to near-space concept[J]. Air Space Power J, 2005, 19(4): 39-50.
- [8] MARCEL M J, BAKER J. Interdisciplinary design of a near-space vehicle[C]//Proc Southeast Conf. Richmond, VA: [s.n.], 2007.
- [9] PERRY R, DIPIETRO R, FANTE R. SAR imaging of moving targets[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1999, 35(1): 188-200.
- [10] LI Zhong-yu, WU Jun-jie, LI Wen-chao, et al. One-stationary bistatic side-looking SAR imaging algorithm based on extended Keystone transforms and nonlinear chirp scaling[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE, 2013, 2(10): 211-215.
- [11] 杜雨滔, 杨建宇. 基于时间-调频斜率分布的多线性调频信号检测与参数估计[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(3): 631-634.  
DU Yu-ming, YANG Jian-yu. Superimposed LFM signals detection and parameter estimation based on time-frequency rate distribution[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(3): 631-634.

编辑 税红