

## FMCW-SAR 体制下快速运动目标检测与成像方法

王金伟 周峰\* 吴玉峰 孙光才 张子敬  
(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 针对调频连续波合成孔径雷达(FMCW-SAR)体制下的快速运动目标检测与成像问题, 该文提出一种双通道 FMCW-SAR 动目标检测和成像新方法。该方法考虑到调频连续波固有的特点, 将多普勒频移补偿和偏置相位天线(DPCA)技术结合, 进行杂波抑制, 检测动目标。并针对快速运动目标的散焦和多普勒谱分裂等问题, 采用 Keystone 变换、方位去斜等方法实现快速运动目标的重聚焦。最后, 仿真实验验证了所提方法的有效性和可行性。  
**关键词:** 合成孔径雷达; 调频连续波; 地面动目标检测与成像

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)11-2684-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01769

## Approach for Fast-moving Target Detection and Imaging in FMCW SAR

Wang Jin-wei Zhou Feng Wu Yu-feng Sun Guang-cai Zhang Zi-jing  
(Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** To resolve the problem of fast-moving target detection and imaging in Frequency Modulated Continuous Wave SAR (FMCW-SAR), a new method of moving target detection and imaging in double-channel FMCW-SAR is presented in this paper. Considering the inherent characteristics of FMCW, the stationary clutter is eliminated and moving targets are detected by combining the Doppler frequency shift compensation with Displaced Phase Center Antenna (DPCA) technology. To solve the problem of fast-moving targets defocus and Doppler spectrum split, one method combining the Keystone transform with azimuth deramp is presented to refocus fast-moving targets. Finally, simulation results are provided to demonstrate the effectiveness and feasibility of the proposed method.

**Key words:** SAR; Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW); Ground Moving Target Indication (GMTI) and imaging

### 1 引言

合成孔径雷达(SAR)<sup>[1-4]</sup>具有全天时、全天候、2 维高分辨力、强穿透性等优点, 广泛应用于海洋科学、遥感、军事和农业等领域。SAR 多采用脉冲体制, 由于该类雷达的功耗大, 信号容易被截获, 因此限制了其应用; 而将合成孔径技术与调频连续波雷达相结合的调频连续波 SAR(FMCW-SAR)<sup>[5-9]</sup>具有体积小、质量轻、功耗低、成本低、隐蔽性较好等优点, 可安装在无人机等小型平台上, 具有相当广泛的应用前景。

动目标检测与成像是 FMCW-SAR 系统研究的一个关键技术。常用的运动目标检测与成像方法较多<sup>[10-15]</sup>, 文献[10]采用 Chirp-Z 变换校正动目标回波距离弯曲, Radon 变换校正剩余距离走动, 改进

的离散 Chirp 傅里叶变换(M-DCFT)搜索参数的方法对慢速运动目标进行参数估计与成像; 文献[11]在常规条带 SAR 模式下对快速目标进行成像; 文献[14]利用三角波调制调频连续波正、负调频导致动目标成像结果在径向反向移动的特性, 对正、负调频信号分别成像并相消, 检测出高速动目标; 文献[15]分析了 FMCW-SAR 动目标检测原理, 并重点研究了剩余视频相位项(RVP)对动目标检测结果的影响并给出补偿方法。上述讨论的方法主要针对条带 SAR 快速目标成像、FMCW-SAR 快速目标检测和 FMCW-SAR 慢速目标成像, 运动目标速度较快会出现大的距离徙动、频谱分裂或模糊的情况, 成像后目标会出现虚影或者散焦, 导致目标的信杂噪比降低, 目标不易被检测, 现有方法无法有效地实现对 FMCW-SAR 快速目标的检测与成像。

针对上述问题并且考虑到 FMCW-SAR 发展的需求, 本文提出一种 FMCW-SAR 体制下快速运动目标检测与成像新方法。该方法利用方位去斜等技术, 在 2 维频域对目标进行粗成像, 将多普勒频移补偿和偏置相位天线(DPCA)技术结合, 进行杂波抑制, 并检测动目标。将检测到的动目标反变换到原

2013-11-11 收到, 2014-06-09 改回

国家自然科学基金(11176022, 61201283, 61172137, 61301292), 新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0916), 基本科研业务费(K5051302047, K5051202001)和信息综合控制国家重点实验室项目(new120080201)资助课题

\*通信作者: 周峰 fzhou@mail.xidian.edu.cn

始数据域,并结合多普勒频移补偿、方位去斜、Keystone变换和模糊数估计等方法实现快速运动目标成像。该方法避免了多普勒谱分裂,有效解决了连续波体制下运动参数未知时的快速运动目标成像问题,极大地提高了信噪比和目标检测概率,且该方法具有对场景中模糊数相同的多目标同时成像的优点。

## 2 信号模型

图1为调频连续波 SAR-GMTI 几何关系图,飞机以速度  $v_a$  沿  $x$  轴飞行,正侧视工作。运动目标  $P$  坐标为  $(x_n, R_n)$ , 横向速度为  $v_x$ , 径向速度为  $v_y$ ,  $v = v_a - v_x$ 。假设  $x_n = 0$ ,  $v_x$  已知(后面会对  $v_x$  和  $x_n$  的影响进行讨论),则点目标  $P$  到雷达的瞬时距离为

$$R(t, R_n) = \sqrt{v^2 t^2 + (R_n + v_y t)^2} \quad (1)$$

对斜距在  $t = 0$  处进行三阶泰勒级数展开,将  $t = \hat{t} + t_m$  代入,并忽略微小量影响,重新整理得

$$R(\hat{t}, t_m) \approx R(t_m) + A_1(t_m)\hat{t} \quad (2)$$

其中  $A_1(t_m) \approx \frac{v^2 t_m}{R(t_m)} + v_y$ ,  $R(t_m) \approx R_n + v_y t_m + \frac{v^2 t_m^2}{2R_n}$

$-\frac{v^2 v_y t_m^3}{2R_n^2}$ ,  $\hat{t}$  为距离快时间,  $t_m$  为方位慢时间。较大速度对应的三次项会影响目标方位旁瓣的对称性,因此将  $R(t_m)$  展开到  $t_m$  的三次项。

将斜距展开式(2)代入调频连续波接收的回波中,近似后得到

$$\begin{aligned} S_{\text{if}}(\hat{t}, t_m) = & A a_r \left[ \hat{t} - \frac{2R(\hat{t}, t_m)}{c} \right] a_a(t_m) \\ & \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} (A_1(t_m)\hat{t}) \right] \exp \left[ j \frac{4\pi\gamma}{c^2} R_\Delta^2 \right] \\ & \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi}{c} \gamma \left( \hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) (R(t_m) - R_{\text{ref}}) \right] \\ & \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_m) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

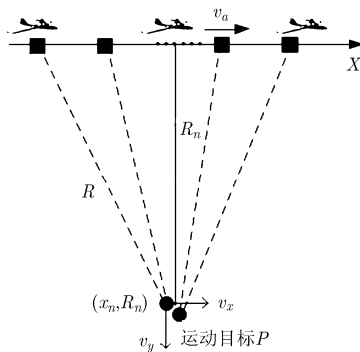


图1 FMCW SAR-GMTI 几何关系

其中  $A$  为复常数,  $\gamma$  为线性调频(LFM)信号的调频率,  $\lambda$  为雷达波长,  $c$  为光速,  $a_r(\cdot)$  和  $a_a(\cdot)$  分别表示 LFM 信号的窗函数和方位窗函数,  $R_\Delta = R(\hat{t}, t_m) - R_{\text{ref}}$ ,  $R_{\text{ref}}$  为参考距离。这里暂不考虑 FMCW-SAR 中频率非线性问题,具体频率非线性校正方法参见文献[16]。

## 3 信号处理方法

### 3.1 杂波抑制

实测场景中,运动目标淹没在静止杂波中,需要进行杂波抑制处理,已有的杂波相消方法较多<sup>[13-15]</sup>,本文采用文献[13]的多通道 DPCA 技术,在方位多普勒域补偿脉内多普勒频移和因通道间距引起的时移,然后结合方位去斜等方法,在 2 维频域对两个通道的数据粗聚焦,并进行相消处理,杂波被极大程度地抑制,提高了数据的信噪比,进而检测运动目标。检测到运动目标后,将目标反变换到原始数据域,进而研究如何对运动目标进行精确成像。

### 3.2 去除视频相位项和方位去斜处理

信号相位中的 RVP 项使多普勒值有些差别,给后面的应用带来不便。本文采用文献[17]中的方法,对式(3)进行距离傅里叶变换,做去除 RVP 项处理。

为了对运动目标进行快速成像,构造如式(4)所示的方位去斜函数  $H_a$ ,进行方位去斜处理,从而有效地压缩运动目标的方位频谱,避免因方位频谱分裂而在成像中出现虚假目标的情况。 $H_a$  中影响目标方位聚焦的主要是第 1 个指数项;第 2 个指数项中三次函数影响聚焦后目标方位向的旁瓣对称性,主要考虑径向速度模糊部分对成像造成的影响,因基带速度对应的三次相位的最大值  $\theta_{\text{max}} \approx 0.28\pi$ ,略大于  $\pi/4$ ,对聚焦效果影响很小,因此忽略其影响。

$$H_a = \exp \left[ j \frac{4\pi}{\lambda} \left( \frac{v^2}{2R_n} t_m^2 \right) \right] \exp \left[ -j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{v^2 v_y t_m^3}{R_n^2} \right] \quad (4)$$

上述处理后,进行距离 IFFT,并将  $A_1(t_m)$  的表达式代入,得

$$\begin{aligned} S_{\text{if}}(\hat{t}, t_m) = & A a_r \left[ \hat{t} - \frac{2R(\hat{t}, t_m)}{c} \right] a_a(t_m) \\ & \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi v^2 t_m \hat{t}}{\lambda R(t_m)} \right] \exp \left[ -j \frac{4\pi (R_n + v_y t_m)}{\lambda} \right] \\ & \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} v_y \hat{t} \right] \\ & \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi}{c} \gamma \left( \hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) (R(t_m) - R_{\text{ref}}) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

### 3.3 多普勒频移补偿

平台连续运动在脉内引入的多普勒频移是调频连续波的重要特性, 对应式(5)中的第 2 个指数项, 其影响目标聚焦, 应予以补偿。由于方位多普勒频率可表示为  $f_a = -2v^2 t_m / \lambda R(t_m)$ , 该多普勒频移项可以表示成  $\exp(-j2\pi f_a \hat{t})$ , 由此, 该项可以在方位多普勒域进行补偿。

### 3.4 徙动校正和方位聚焦

上述处理后, 信号还存在严重的距离和方位耦合, 影响目标的聚焦, 需要做去除 2 维耦合处理。首先, 构造距离徙动校正函数  $H_{\text{RMC}}$ , 由于 FMCW-SAR 模型满足小场景假设, 可忽略场景内回波等效线性调频率的空变性, 将  $R_n$  用  $R_s$  表示,  $R_s$  为场景中心最短斜距。

$$H_{\text{RMC}} = \exp\left[j\frac{4\pi}{c}\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\left(\frac{v^2 t_m^2}{2R_s} - R_{\text{ref}}\right)\right] \quad (6)$$

当动目标径向速度较大时, 对应的多普勒偏移会超出系统的脉冲重复频率 ( $\pm\text{PRF}/2$ ), 即动目标多普勒存在模糊, 此时,  $v_y$  可以写为

$$S_{\text{if}}(f_r, \tau_m) \approx A' \text{sinc}\left[T_p\left(f_r + \frac{2v_{y_0}}{\lambda} + \frac{2\gamma}{c}(R_n - R_{\text{ref}})\right)\right] a_a(\tau_m) \exp\left[j\frac{8\pi R_{\text{ref}} \gamma v_{y_0}}{c^2} \tau_m\right] \cdot \exp\left[-j4\pi\left(R_n + \left(v_{y_0} + N\frac{\lambda}{2}\text{PRF}\right)\tau_m + \frac{v^2}{2R_n}\tau_m^2\right)f_r/c\right] \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}f_c v_{y_0} \tau_m\right] \quad (10)$$

其中  $A' = A \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R_n\right] \exp\left[j\frac{8\pi R_{\text{ref}}}{c^2}\gamma(R_n - R_{\text{ref}})\right]$ ,

$T_p$  为脉冲宽度。

上述信号中的徙动项  $H_0$ , 因其相位远小于  $\pi/4$ , 忽略其影响。

$$H_0 = \exp\left[j2\pi\frac{v^2 \tau_m^2}{cR_n} f_r\right] \exp\left[j2\pi N \frac{\text{PRF}}{f_c} \tau_m f_r\right] \quad (11)$$

对上述处理结果进行方位 FFT, 便得到聚焦后的信号。

$$S_{\text{if}}(f_r, f_a) \approx A' \text{sinc}\left[T_p\left(f_r + \frac{2v_{y_0}}{\lambda} + \frac{2\gamma}{c}(R_n - R_{\text{ref}})\right)\right] \cdot \text{sinc}\left[T_a\left(f_a + \frac{2v_{y_0}}{\lambda} - \frac{4\gamma R_{\text{ref}} v_{y_0}}{c^2}\right)\right] \cdot \exp\left[-j4\pi R_n f_r/c\right] \quad (12)$$

其中  $T_a$  为合成孔径时间。

### 3.5 模糊数估计

本文通过构造不同的模糊数函数  $H_{\text{blur}}$ , 并结合

$$v_y = v_{y_0} + N \frac{c \text{PRF}}{2f_c} = v_{y_0} + N \frac{c \text{PRF}}{2(\gamma \hat{t} + f_c)} - N \frac{c \text{PRF}}{2f_c} \sum_{i=1}^{+\infty} \left(-\frac{\gamma \hat{t}}{f_c}\right)^i \approx v_{y_0} + N \frac{c \text{PRF}}{2(\gamma \hat{t} + f_c)} + N \frac{c \text{PRF} \gamma \hat{t}}{2f_c^2} \quad (7)$$

$v_{y_0}$  为不模糊的基带信号对应的径向速度分量, 且满足  $v_{y_0} \in [-\text{PRF} \lambda/4, \text{PRF} \lambda/4]$ ,  $N$  为径向速度引起的模糊数, PRF 为脉冲重复频率。式(7)中, 采用了近似  $\gamma \hat{t} \ll f_c$ , 忽略  $\gamma \hat{t}/f_c$  的二次及二次以上的项的影响。将式(7)代入, 并构造模糊数函数  $H_{\text{blur}}$  进行补偿。

$$H_{\text{blur}} = \exp\left[-j\frac{4\pi R_{\text{ref}} \gamma N \lambda \text{PRF}}{c^2} t_m\right] \cdot \exp\left[j\frac{2N\pi \text{PRF}}{f_c}(\gamma \hat{t} + f_c)t_m\right] \cdot \exp(j2\pi N \text{PRF} \hat{t}) \quad (8)$$

补偿模糊数函数后, 信号仍然存在距离和方位耦合, 采用 Keystone 变换处理, 即进行式(9)的变量代换:

$$f_c \tau_m / (\gamma \hat{t} + f_c) = t_m \quad (9)$$

对变换后的信号做距离 FFT, 并近似处理, 得到

Keystone 变换对目标成像, 比较图像熵值, 使图像熵值达到最小的模糊数即为真实的模糊数  $N$ 。同时该方法可以对杂波抑制后的大块场景数据进行统一处理, 即取可能的模糊数, 进行快速目标的模糊数函数校正, 并进行 Keystone 走动校正和成像处理, 当目标的模糊数与遍历的模糊数一致时, 相同模糊数的多运动目标可以实现同时成像。

实测数据处理中, 由于干扰的存在, 通道不一致性或杂波非平稳性等将造成杂波抑制不充分, 进而造成数据信杂噪比较低, 导致难以检测到快速弱小运动目标, 另外, 当场景中存在多个运动目标时, 粗聚焦的动目标图像可能存在重叠, 此时, 常规的时频分析方法<sup>[7]</sup>很难准确获得动目标的模糊数, 而采用上述模糊函数校正的方法可有效克服上述缺点。

## 4 应用问题分析

### 4.1 未知沿航向速度的影响

方位向速度  $v_x$  会导致动目标的多普勒带宽展宽

或缩短, 方位去斜后目标的带宽  $B_a$  为

$$B_a = 2\sqrt{(v_a - v_x)^2 - v_a^2} / D \quad (13)$$

其中  $D$  为方位向天线长度。当目标径向速度引起的多普勒中心偏移较大时, 会出现目标谱分裂。假设动目标初始位置位于场景中心, 为保证动目标信号不发生分裂, 需满足

$$\left| \frac{2v_{y_0}}{c} (f_c + f_r) \pm \frac{B_a}{2} \right| \leq \frac{\text{PRF}}{2} \quad (14)$$

而在不进行方位去斜时, 为保证动目标信号不发生分裂, 需要满足

$$\left| \frac{2v_{y_0}}{c} (f_c + f_r) + \frac{v_a - v_x}{D} \right| \leq \frac{\text{PRF}}{2} \quad (15)$$

采用式(14)和式(15), 并结合表 1 的参数, 得到

$$S_{\text{if}}(f_r, \tau_m) \approx A' \text{sinc} \left( T_p \left( f_r + \frac{2v_{y_0}}{\lambda} + \frac{2\gamma}{c} (R_n - R_{\text{ref}}) \right) \right) a_a(\tau_m) \exp \left( j \frac{8\pi R_{\text{ref}} \gamma v_{y_0}}{c^2} \tau_m \right) \cdot \exp \left( -j \frac{4\pi R_n}{c} f_r \right) \exp \left( -j \frac{4\pi}{\lambda} v_{y_0} \tau_m \right) \exp \left( j \frac{4\pi}{\lambda} \left( \frac{v^2 t_c \tau_m}{R_n} + \frac{v^2 v_y (3\tau_m t_c^2 - 3\tau_m^2 t_c)}{2R_n^2} \right) \right) \quad (16)$$

其中  $A' = A \exp \left( j \frac{8\pi R_{\text{ref}}}{c^2} \gamma (R_n - R_{\text{ref}}) \right) \exp \left( -j \frac{4\pi}{\lambda} \left( R_n - v_y t_c + \frac{v^2 t_c^2}{2R_n} + \frac{v^2 v_y t_c^3}{2R_n^2} \right) \right)$ 。对于存在径向速度并

且方位位置不在场景中心的目标, 仍采用图像偏置法估计方位向剩余调频率, 补偿其对应的二次相位, 然后做方位傅里叶变换, 便得到聚焦良好的图像。

## 5 仿真结果与算法分析

为了验证本文 FMCW-SAR 动目标检测和成像方法的有效性, 本节给出仿真实验结果和算法性能分析。调频连续波雷达工作在正侧条带 SAR 模式下, 主要工作参数如表 1 所示。

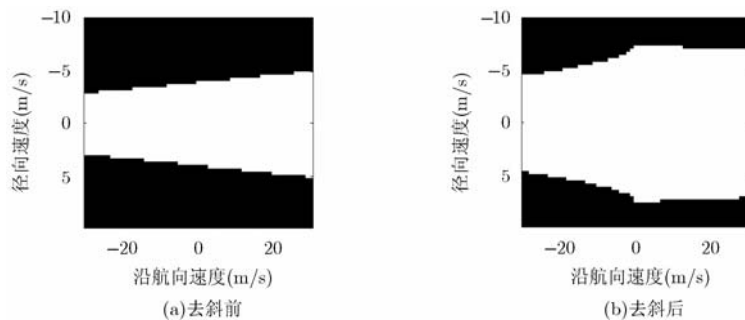


图 2 去斜前后可处理参数空间

未进行去斜和去斜之后的无虚影的参数范围, 如图 2 所示。比较图 2(a)和图 2(b), 可知本文方法能够扩展可处理的参数空间。当载机速度变大时, 可处理空间将得到极大的扩展, 可以进一步体现本文算法的优越性。

当出现运动目标的沿航向速度处于可处理参数空间外时, 采取文献[11]的方法处理。沿航向速度导致目标方位向散焦, 这里采用图像偏置法<sup>[17]</sup>估计信号方位向剩余调频率, 并补偿掉该调频率对应的二次相位项, 然后做方位傅里叶变换, 便可以得到聚焦良好的图像。

### 4.2 目标方位位置不在场景中心

方位位置不在场景中心的目标, 存在一个时间为  $t_c$  的时延, 同样经过前述处理, 在经过最后的方位 FFT 处理之前, 得到

表 1 雷达系统主要参数

发射带宽	150 MHz
方位波束宽度	4°
采样频率	1 MHz
脉冲宽度	1 ms
载机速度	100 m/s
PRF	1000 Hz
载频	10 GHz
斜距	1500 m

仿真场景中设置了 30 个点目标, 其幅度相等, 其中包含 25 个静止目标和 5 个运动目标, 坐标分布如图 3 所示, 动目标有不同程度的速度模糊, 为了

凸显本文方法的优势，即可以对杂波抑制后难以提取的目标成像，本文选取信噪比为 0 dB，具体速度参数如表 2 所示。

表 2 动目标速度参数和对应模糊数

动目标	M1	M2	M3	M4	M5
幅度	1	1	1	0.05	0.05
径向速度(m/s)	21	34	-10	-47	-49
沿航向速度(m/s)	0	0	10	0	0
模糊数	1	2	-1	-3	-3

图 4 为本文在 2 维频域对场景中所有点初步成像结果，此时，运动目标淹没在静止杂波中。图 5 为利用 DPCA 原理杂波相消后的图像，杂波被极大程度地抑制，利用 CFAR<sup>[18]</sup>原理逐个检测运动目标，归类后记录其距离位置，方便后续去斜函数的构造。

被剩余杂波和噪声淹没的动目标 M4 和 M5 为快速弱小运动目标，其信杂噪比较低，难以检测，常规方法很难准确获得该运动目标的模糊数；而采用本文的构造模糊数函数的方法，并结合 Keystone 变换对目标提取后的剩余场景进行处理，可以聚焦弱小快速运动目标 M4 和 M5，极大地提高信杂噪比，方便后续对该目标的提取和进一步处理。接下来对成像结果进行分析。

图 6 为目标 M1 的方位去斜前后的距离多普勒谱和本文方法的聚焦结果，可以看出，去斜后，目标多普勒谱得到压缩，避免频谱分裂的出现，且 M1 聚焦良好。图 7 为利用图像最小熵估计的模糊数，由估计的模糊数可以对目标更好地聚焦；杂波抑制后，动目标 M4 和 M5 未被检测到，此时无法估计其模糊数，对该目标的成像方法如上文所述。

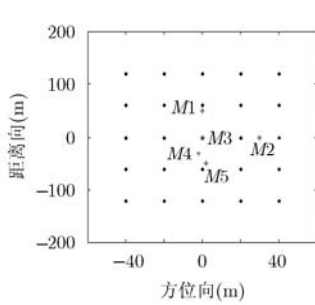


图 3 场景点目标分布

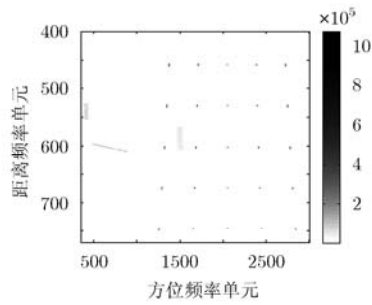


图 4 杂波相消前成像

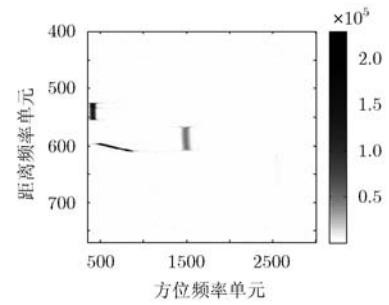
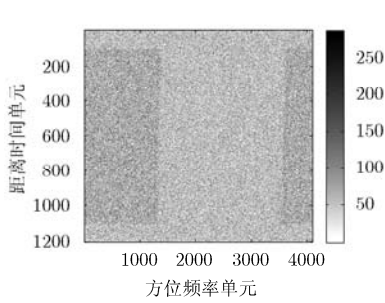
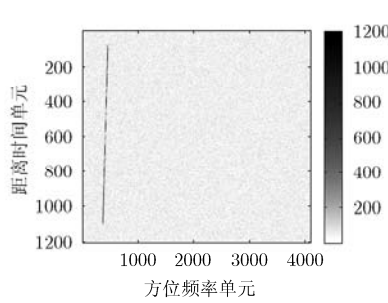


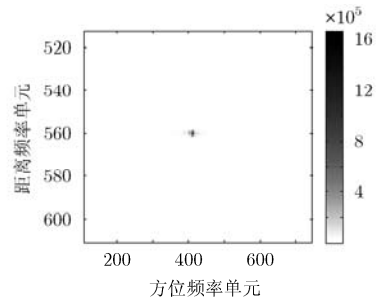
图 5 杂波相消后图像



(a) M1 去斜前多普勒谱

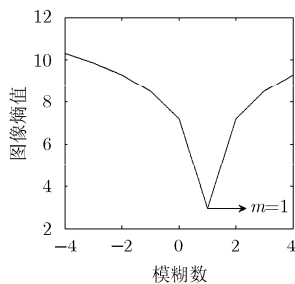


(b) M1 去斜后多普勒谱

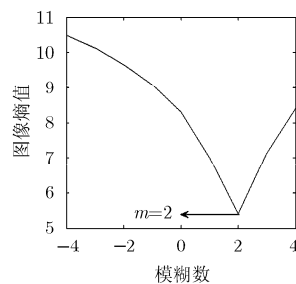


(c) M1 聚焦结果

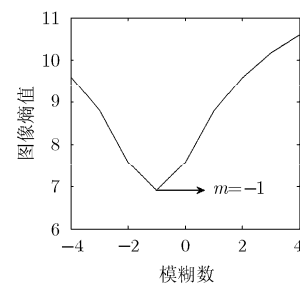
图 6 M1 方位去斜前后多普勒谱对比和最终成像结果



(a) M1 模糊数估计



(b) M2 模糊数估计



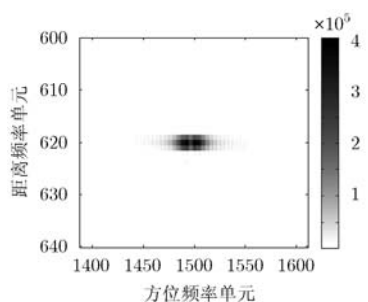
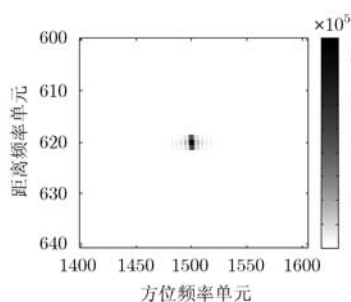
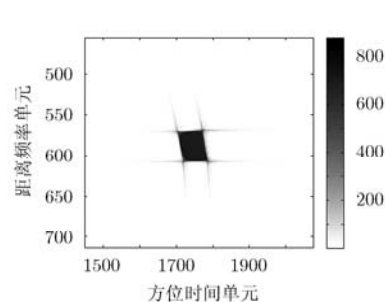
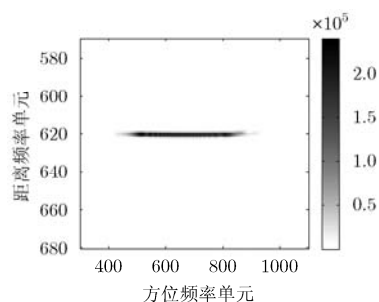
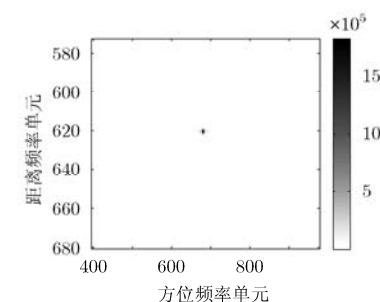
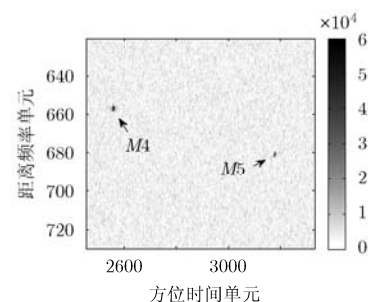
(c) M3 模糊数估计

图 7 图像最小熵估计模糊数

图 8 为动目标  $M_2$  的粗聚焦图像, 因其方位位置不在场景中心, 导致方位存在严重散焦, 采用前述所述方位调频率补偿处理, 得到结果如图 9 所示。图 10 为文献[14]对快速运动目标  $M_2$  的成像效果图, 目标没有得到良好的聚焦。由图 9 可知, 本文方法对快速运动目标成像结果良好, 与图 10 相比, 动目标聚焦效果得到极大改善。

图 11 为动目标  $M_3$ ,  $M_4$  和  $M_5$  的重聚焦成像结果图, 因目标  $M_3$  存在沿航向速度, 导致其方位向散焦, 经过方位调频率补偿处理后, 便可以得到

聚焦良好的图像。图 11(c)为本文利用构造模糊数函数的方法, 并结合 Keystone 变换对目标提取后的剩余场景进行处理的结果, 得到目标  $M_4$  和  $M_5$  在剩余杂波和噪声的图像, 因模糊数相同, 两目标同时聚焦, 并从背景杂波和噪声中清晰地显现出来。综合上述处理结果, 可以发现本文方法避免了多普勒分裂带来的问题, 可以对快速运动目标进行有效地检测与成像, 同时具备对模糊数相同的目标同时聚焦的优点。

图 8  $M_2$  粗聚焦图像图 9  $M_2$  深度聚焦图像图 10 文献[14]对  $M_2$  的处理结果(a) 方位调频率补偿前的  $M_3$  图像(b) 方位调频率补偿后的  $M_3$  图像(c) 动目标  $M_4$  和  $M_5$  重聚焦图像图 11 动目标  $M_3$ ,  $M_4$  和  $M_5$  重聚焦图像

## 6 结论

随着雷达技术的不断发展, 调频连续波合成孔径雷达在军事与民用中的作用越来越重要, 为了同时完成对观测区域静止目标和运动目标的精确描述, 调频连续波 SAR 体制下的运动目标检测与成像技术, 特别是对研究相对较少的快速运动目标检测与成像技术也变得越来越重要。本文提出了一种双通道 FMCW-SAR 快速运动目标检测和成像新方法, 利用 DPCA 原理进行杂波相消, 并利用方位去斜、Keystone 变换、最小熵估计模糊数等技术对运动目标重新聚焦。通过仿真实验, 验证了调频连续波合成孔径雷达体制下, 本文方法对快速运动目标检测与成像的有效性。

## 参考文献

[1] 张佳佳, 周芳, 孙光才, 等. 基于机载前向阵雷达的三通道

SAR-GMTI 技术研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 344-350.

Zhang Jia-jia, Zhou Fang, Sun Guang-cai, et al. Study on three channels squint SAR-GMTI system based on the forward-looking airborne radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(2): 344-350.

[2] 邓云凯, 赵凤军, 王宇. 星载 SAR 技术的发展趋势及应用浅析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 1-10.

Deng Yun-kai, Zhao Feng-jun, and Wang Yu. Brief analysis on the development and application of spaceborne SAR[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 1-10.

[3] 吴明宇, 杨桃丽, 吴顺君, 等. 星载多通道高分辨率宽测绘带 SAR 系统运动目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(2): 441-444.

Wu Ming-yu, Yang Tao-li, Wu Shun-jun, et al. Ground moving target indication for spaceborne multi-channel high resolution wide swath SAR system[J]. *Journal of Electronics*

- & *Information Technology*, 2014, 36(2): 441-444.
- [4] Cristallini D, Pastina D, Colone F, *et al.* Efficient detection and imaging of moving targets in SAR images based on chirp scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(4): 2403-2416.
- [5] 张峰会, 王岩飞. 一种消除调频连续波 SAR 距离频谱混叠的 FS 算法[J]. *雷达学报*, 2012, 1(1): 76-81.  
Zhang Feng-hui and Wang Yan-fei. An improved FS algorithm for range anti-aliasing of FMCW SAR[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 76-81.
- [6] Meta A, Hoogeboom P, and Ligthart L P. Signal processing for FMCW SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3519-3532.
- [7] Wang R, Loffeld O, Nies H, *et al.* Focus FMCW SAR data using the wavenumber domain algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2109-2118.
- [8] 马兵强, 于彬彬, 刘畅, 等. 条带 FMCW-SAR 回波数据的二维频域模拟算法[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(2): 375-380.  
Ma Bing-qiang, Yu Bin-bin, Liu Chang, *et al.* A 2-D Fourier domain algorithm for stripmap FMCW-SAR raw signal simulation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(2): 375-380.
- [9] Ribalta A. Time-domain reconstruction algorithms for FMCW SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(3): 396-400.
- [10] 梁毅, 王虹现, 邢孟道, 等. 调频连续波 SAR 慢速动目标参数估计与成像[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(5): 1001-1006.  
Liang Yi, Wang Hong-xian, Xing Meng-dao, *et al.* Slow ground moving target parameter estimation and imaging in FMCW SAR systems[J]. *Engineering and Electronics*, 2011, 33(5): 1001-1006.
- [11] Sun Guang-cai, Xing Meng-dao, Xia Xiang-gen, *et al.* Robust ground moving-target imaging using deramp-Keystone processing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(2): 966-982.
- [12] Wang Pu, Li Hong-bin, and Himed Braham. A parametric moving target detector for distributed MIMO radar in non-homogeneous environment[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(9): 2282-2294.
- [13] 黄大荣, 孙光才, 吴玉峰, 等. 三通道 TOPSAR-GMTI 技术研究[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(1): 41-48.  
Huang Da-rong, Sun Guang-cai, Wu Yu-feng, *et al.* Research on three-channel TOPSAR-GMTI technology[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(1): 41-48.
- [14] Liang Yi, Zhang Long, Xing Meng-dao, *et al.* High speed ground moving target detection research using triangular modulation FMCW[J]. *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China*. 2009, 4(2): 127-133.
- [15] 耿淑敏, 李星. FM-CW SAR 动目标检测算法研究[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(9): 120-123.  
Geng Shu-min and Li Xing. Study on moving target detection algorithm for FM-CW SAR[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(9): 120-123.
- [16] Yang Jian, Liu Chang, and Wang Yan-fei. Nonlinearity correction of FMCW SAR based on homomorphic deconvolution[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(5): 991-995.
- [17] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 24-30, 204-206, 263-272.  
Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Techniques[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 24-30, 204-206, 263-272.
- [18] Christoph H G. Statistical analysis of multilook SAR interferograms for CFAR detection of ground moving targets [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(4): 691-701.
- 王金伟: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像和动目标检测.
- 周 峰: 男, 1980 年生, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达成像和雷达对抗.
- 吴玉峰: 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像和运动补偿.