

基于前向阵雷达的三通道地面快速动目标检测与成像方法

张佳佳* 周芳 孙光才 邢孟道 保铮
(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 针对3通道前向阵雷达 SAR-地面运动目标检测(SAR-GMTI)体制, 该文提出一种易实现的地面快速动目标检测与定位新方法。该方法针对快速运动目标距离散焦严重问题及多普勒谱折叠带来的处理过程繁琐等问题, 在杂波抑制后对快速动目标进行重聚焦从而实现快速目标的检测, 并在重聚焦过程中先充分压缩多普勒带宽再进行距离走动校正, 有效避免了多普勒谱折叠。仿真结果验证了该文方法的有效性。

关键词: 前向阵雷达; SAR-地面运动目标检测(GMTI); 地面快速运动目标; 多普勒谱折叠

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)01-0008-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00749

Approach for Ground Fast-moving Target Detection and Imaging Based on the Three-channel Forward-looking Radar

Zhang Jia-jia Zhou Fang Sun Guang-cai Xing Meng-dao Bao Zheng
(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A new practical approach for ground fast-moving target detection and imaging is presented for the three-channel SAR-Ground Moving Target Indication (SAR-GMTI) system based on the forward-looking configuration. Considering the facts that fast-moving targets defocus in SAR image and Doppler spectrum folding demands complicated processing, fast-moving targets after clutter suppression are refocused in order to detect these targets, in the procedure of which the Doppler spectrum is adequately compressed before range walk correction which avoids effectively Doppler spectrum folding. The simulation results validate the effectiveness of the approach presented in this paper.

Key words: Forward-looking radar; SAR-Ground Moving Target Indication (GMTI); Ground fast-moving target; Doppler spectrum folding

1 引言

多通道 SAR-GMTI(SAR-Ground Moving Target Indication)系统能够全天时、全天候地对地面运动目标进行检测、测速及定位, 已经广泛应用于战场侦察等军事应用。现有的大部分 SAR-GMTI 系统及相应的 SAR-GMTI 技术都是基于正侧面阵雷达的。为了全方位地探测远距离地面运动目标, 往往要求前向阵雷达也能够进行地面运动目标检测。现在研究较多的适用于前向阵雷达的多通道 GMTI 技术主要是 STAP(Space Time Adaptive Processing)^[1,2], 但是 STAP 在实际工程中实现代价较大, 因此研究适用于前向阵雷达且在工程上易于实现的 SAR-GMTI 技术具有重要的实际意义。

文献[3]提出了一种适用于前向阵雷达的4通道动目标检测方法, 该方法对雷达平台运动参数的估计精度要求较低, 工程上易于实现, 但是仅适用于

分辨率较低的情况。文献[4]提出了一种基于机载前向阵的3通道动目标检测与定位方法, 利用改进的 DPCA(Displaced Phase Center Antenna)技术实现动目标检测、测速与定位, 具有较高性能且容易在工程上实现, 但是该方法仅针对慢速目标, 不适用于对快速目标的处理。定义由于径向速度足够大而导致多普勒中心模糊或部分模糊的动目标为快速运动目标。快速运动目标一般距离走动量较大, 同时存在多普勒中心模糊, 采用文献[4]的方法会导致在 SAR 图像中散焦严重, 进而导致杂波抑制后动目标信杂噪比低, 动目标检测性能严重恶化且无法进行运动参数估计等一系列问题。另外由于系统的脉冲重复频率(PRF)一般不比方位带宽大很多, 径向速度引起的多普勒偏移一般会导致快速目标的多普勒谱发生折叠, 导致目标信号能量分裂为两部分, 不利于信号能量的积累。如果在距离走动校正之前对多普勒谱分裂的动目标进行频谱重建^[5,6], 则运算量显著增加且过程较为繁琐。

为了解决上述问题, 本文提出了一种易实现的基于前向阵雷达的3通道地面快速动目标检测与定

2012-06-13 收到, 2012-09-13 改回

国家自然科学基金重大项目(60890072)资助课题

*通信作者: 张佳佳 zjjreal@gmail.com

位方法。该方法在杂波抑制后对快速动目标进行重聚焦以提高检测概率，同时为之后的运动参数估计提供基础。其特点体现在：针对多普勒谱折叠问题，在重聚焦过程中，对快速目标信号先采用方位去斜处理充分压缩目标的多普勒带宽，再进行距离走动校正，有效避免了多普勒谱折叠，简化了处理过程。仿真分析证明了该方法的有效性。

2 系统几何模型

基于前向阵雷达的 3 通道 SAR-GMTI 系统几何模型如图 1 所示，3 个通道 1~3 分布在与航向垂直的前向阵面上，各通道之间具有水平方向的基线。雷达工作在前斜视模式，全孔径发射信号，3 个通道同时接收回波，以通道 2 为参考通道。载机沿 x 轴方向飞行，飞行速度为 v ，飞行高度为 H ，斜视角为 θ_0 。在方位慢时间 $t_m = 0$ 时刻，波束中心指向场景中心，场景中心点坐标为 $(X, Y, 0)$ ，场景中心与参考通道之间的斜距为 R_s 。3 个通道等效相位中心坐标为 $(0, d_i, H)$ ， $i = 1, 2, 3$ 。为了方便讨论，假设雷达作用距离远远大于子孔径之间的基线，采用等效相位中心原理进行模型分析。

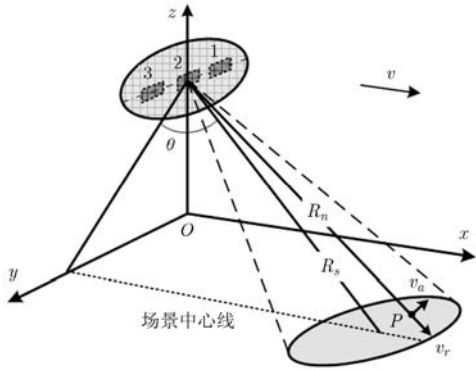


图 1 基于前向阵雷达的 3 通道 SAR-GMTI 系统几何模型图

设地面场景上某动目标 P 的初始坐标为 $(X + x_n, y_n, 0)$ ，动目标沿 x 轴和 y 轴方向的速度分量分别为 v_x 和 v_y ，则动目标 P 到第 i ($i = 1, 2, 3$) 个等效相位中心的瞬时斜距为^[4]

$$\begin{aligned} R_i(t_m) &= \sqrt{(X + x_n - (v - v_x)t_m)^2 + (y_n - d_i + v_y t_m)^2 + H^2} \\ &\approx R_n - \Delta r_i - \left(v \sin \theta_0 + \frac{x_n v \cos^2 \theta_0}{R_n} + \frac{\Delta r_i v \sin \theta_0}{R_n} - v_r \right) \\ &\quad \cdot t_m + \frac{(v \cos \theta_0 - v_a)^2}{2R_n^2} t_m^2 \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\Delta r_i = d_i y_n / R_n$ ， $R_n = \sqrt{(X + x_n)^2 + y_n^2 + H^2}$ 为 $t_m = 0$ 时刻参考通道到目标 P 的距离， $v_r = [v_x(X +$

$x_n) + v_y y_n] / R_n$ ， $v_a = v_x \sqrt{y_n^2 + H^2} / R_n - v_y y_n (X + x_n) / (R_n \sqrt{y_n^2 + H^2})$ 分别是动目标的速度在斜距方向和垂直斜距方向的分量，可看作等效的径向速度和相对方位速度^[4]。

3 杂波抑制

设雷达发射线性调频脉冲信号，则第 i 个等效相位中心接收的距离脉冲压缩后的基频回波信号为

$$\begin{aligned} S_i(\hat{t}, t_m; R_n) &= \sigma_n \text{sinc} \left(B \left(\hat{t} - \frac{2R_i(t_m, R_n)}{c} \right) \right) \\ &\quad \cdot a_a(t_m) \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_i(t_m, R_n) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

其中 \hat{t} 为距离快时间， σ_n 为散射系数， $a_a(\bullet)$ 为方位窗函数， B 为发射信号带宽， c 为光速， λ 为中心载频对应的波长。

对信号进行距离走动校正^[4]之后做方位傅里叶变换，得到 2 维频域的信号

$$\begin{aligned} S_i(f_r, f_a; R_n) &= \sigma_n A_r(f_r) A_a(f_a) \\ &\quad \cdot \exp \left(j \frac{\pi c R_n}{2(f_r + f_c)(v \cos \theta_0 - v_a)^2} f_a^2 \right) \\ &\quad \cdot \exp \left(-j \frac{2\pi(f_r + f_c)}{c} R_n \right) \\ &\quad \cdot \exp(j(\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3)) \exp(j\xi) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $A_r(\bullet)$ 和 $A_a(\bullet)$ 分别为距离和方位频域窗函数， f_r 为距离频率， $f_a \in (-\text{PRF}/2, \text{PRF}/2)$ 为方位频率。快速运动目标的模糊数为 M ，定义快速运动目标的基带径向速度 $v_{rb} = v_r + \lambda M \text{PRF}/2$ 。 ξ 是动目标信号的固有相位，对动目标的检测和定位没有影响，因此公式中不再写出其表达式。相位 $\Phi_1 \sim \Phi_3$ 分别为

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \frac{2\pi(R_n v_r - x_n v \cos^2 \theta_0 - \Delta r_i v \sin \theta_0)^2}{c R_n (v \cos \theta_0 - v_a)^2} f_r \\ &\quad + \frac{4\pi \Delta r_i}{c} f_r \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Phi_2 &= \frac{2\pi R_n v_{rb}}{(v \cos \theta_0 - v_a)^2} f_a - \frac{2\pi \Delta r_i v \sin \theta_0}{R_n (v \cos \theta_0 - v_a)^2} f_a \\ &\quad - \frac{2\pi x_n v \cos^2 \theta_0}{(v \cos \theta_0 - v_a)^2} f_a \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Phi_3 = -\frac{4\pi \Delta r_i v_{rb} v \sin \theta_0}{\lambda R_n (v \cos \theta_0 - v_a)^2} + \frac{4\pi \Delta r_i}{\lambda} \quad (6)$$

其中 Φ_1 的第 1 项是动目标信号固有的距离向位置偏移，第 2 项是 Δr_i 引起的各通道 SAR 图像距离向整体偏移； Φ_2 的第 1 项是由径向速度 v_r 引起的动目标方位向位置偏移，第 2 项是由 Δr_i 引起的各通道 SAR 图像方位向整体偏移，第 3 项为点目标的位置信息；

Φ_3 的第 1 项包含通道间的干涉相位信息, 第 2 项是 Δr_i 引起的通道间相位偏差, 它随距离和方位空变, 因此需要在图像域补偿掉。

对杂波进行弯曲校正和二次距离脉压后, 构造补偿函数补偿通道间距离偏移和方位偏移, 补偿函数为

$$H_2(i) = \exp\left[-j\frac{4\pi\Delta r_{ci}}{c}f_r\right] \exp\left[j\frac{2\pi\Delta r_{ci}\tan\theta_0}{v\cos\theta_0}f_a\right] \quad (7)$$

其中 $\Delta r_{ci} = Yd_i/R_s$ 为 Δr_i 的非空变部分。由于 Δr_i 的空变部分一般远远小于距离分辨单元和方位分辨单元的一半, 因此这里只考虑非空变部分对距离和方位包络的影响。将 H_2 与式(3)相乘, 然后将信号变换到 2 维时域, 构造杂波的方位去斜函数对信号进行方位 Dechirp 成像, 得到 SAR 复图像

$$\begin{aligned} S_{\text{Imgi}}(\hat{t}, f_a; R_n) &= \sigma_n a_r \left(\hat{t} - \frac{2R_n}{c}\right) A_a \left(f_a - \frac{2x_n v \cos^2 \theta_0}{\lambda R_n} + \frac{2v_{rb}}{\lambda}\right) \\ &\cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}(R_n - \Delta r_i)\right] \\ &\cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} \frac{\Delta r_i v_{rb} v \sin \theta_0}{(v \cos \theta_0 - v_a)^2}\right] \end{aligned} \quad (8)$$

此时场景静止目标已经 2 维聚焦, 而快速动目标受到距离徙动和方位去斜函数失配的影响会存在较严重的散焦。这会严重降低快速动目标信号的信杂噪比, 不利于目标的检测。

由式(8)可见, 得到 3 个通道的 SAR 图像后, 须先补偿掉 Δr_i 引起的通道间相位偏差才能进行图像两两相消抑制杂波。记 SAR 图像上各像素坐标对应的位置信息为 (\hat{R}_n, \hat{x}_n) , 由式(8)可知成像后动目标位置为

$$(\hat{R}_n, \hat{x}_n) = \left(R_n - \frac{R_n v_r^2}{2v^2 \cos^2 \theta_0} + \frac{x_n v_r}{v}, x_n - \frac{R_n v_r}{v \cos^2 \theta_0}\right) \quad (9)$$

根据几何关系构造补偿相位

$$H_3(i) = \exp(-j4\pi \Delta \hat{r}_i / \lambda) \quad (10)$$

其中 $\Delta \hat{r}_i = d_i \hat{y}_n / \hat{R}_n$ 。乘以补偿相位之后静止目标的通道间相位偏差已经被补偿, 但是对于动目标来说, 由于径向速度会使动目标在图像上偏离原本的方位位置, 因此, 此时动目标的通道间相位偏差没有得到补偿, 动目标的通道间相位偏差变为 $\Delta \phi_i = 4\pi(\Delta r_i - \Delta \hat{r}_i) / \lambda$ 。

补偿通道间相位偏差之后, 对 3 通道 SAR 图像进行两两相消抑制杂波, 得到通道 1 和通道 2 相消结果 $I_{12}(t_m)$ 和通道 3 和通道 2 对相消结果 $I_{32}(t_m)$ 。这里给出 $I_{12}(t_m)$ 的表达式:

$$I_{12}(t_m) = S_{\text{Img}2}(t_m) \cdot j2 \exp(j\psi_1) \sin(j\psi_1) \quad (11)$$

其中

$$\psi_1 = \frac{\Delta \phi_i}{2} - \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta r_i v_{rb} \tan \theta_0}{v \cos \theta_0} \quad (12)$$

这里假设 $v_a \ll v$, 因此可认为 $1/(v \cos \theta_0 - v_a)^2 \approx 1/v^2 \cos^2 \theta_0$ 。同理可得到 $I_{32}(t_m)$ 的表达式。

由式(11)可知, 进行杂波相消后动目标信号的能量也会因为部分相消有所损失。不妨设动目标信号初始位置在场景中心点, 由式(11)及第 6 节的仿真参数可得到杂波相消后动目标能量剩余随基带径向速度变化曲线, 如图 2 所示。可见当动目标基带径向速度为 0.99 m/s 的时候动目标能量损失为 10 dB。

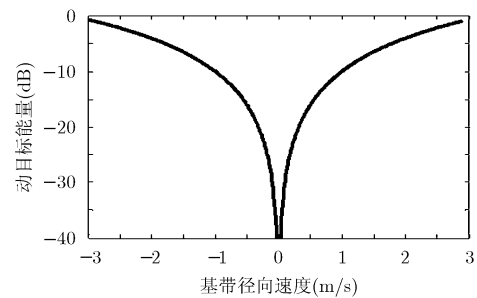


图 2 动目标能量剩余随基带径向速度变化曲线

4 快速运动目标重聚焦

在杂波抑制过程中, 针对静止目标进行距离徙动校正, 而快速动目标的距离徙动特点与静止目标相差很大, 这导致的快速目标的距离徙动没有得到相应的校正, 从而在图像上严重散焦。杂波抑制后, 为了提高快速目标的检测概率并进行干涉定位, 本文对快速目标重新进行聚焦。实现快速目标重新聚焦的思路是先恢复杂波聚焦过程中校正的杂波距离徙动, 并针对快速动目标进行距离徙动校正, 最后再进行方位聚焦。

首先恢复补偿掉的通道间相位偏差, 即将式(12)乘以相位

$$H_4(i) = \exp(j2\pi \Delta \hat{r}_i / \lambda) \quad (13)$$

然后恢复方位调制, 并进行距离弯曲校正和二次距离脉冲压缩的逆过程, 然后将动目标信号变换到距离频域方位时域

$$\begin{aligned} I_{i2}(f_r, t_m; R_n) &= \sigma_n A_r(f_r) a_a(t_m) \exp(-j4\pi(f_r + f_c)R_n/c) \\ &\cdot \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda} \left(\Delta r_i - \frac{\Delta r_i v_{rb} v \sin \theta_0}{(v \cos \theta_0 - v_a)^2}\right)\right] \\ &\cdot \exp(j\phi(t_m)) \end{aligned} \quad (14)$$

其中跟方位慢时间有关的相位

$$\phi(t_m) = \frac{4\pi}{c}(f_r + f_c) \left(\frac{x_n v \cos^2 \theta_0}{R_n} - v_r \right) t_m - \frac{2\pi}{c}(f_r + f_c) \frac{(v \cos \theta_0 - v_a)^2}{R_n} t_m^2 \quad (15)$$

现有的快速目标检测方法^[7-13]在此时利用 Keystone 变换校正基带速度引起的距离走动。但是存在多普勒谱折叠时，由于多普勒谱分裂为模糊数不同的两部分，进行 Keystone 变换后，动目标的轨迹会分裂为斜率不同的两部分。则聚焦后的动目标会分裂为两个目标。为了避免此现象并充分利用动目标能量，文献[5]在 Keystone 变换之前对发生折叠的动目标的多普勒谱进行重建。谱重建需要首先判断折叠的两部分是否属于同一个目标，再进行谱拼接等操作，处理过程相当繁琐。针对此问题，本文提出在对动目标进行距离走动校正之前，先对动目标进行方位去斜处理，充分压缩动目标的多普勒谱，从而尽可能避免多普勒折叠现象。构造方位去斜函数

$$H_5 = \exp\left(\frac{2\pi v^2 \cos^2 \theta_0}{\lambda R_s} t_m^2\right) \exp\left(\frac{2\pi v^2 \cos^2 \theta_0}{c R_n} f_r t_m^2\right) \quad (16)$$

方位去斜完成后，信号发生了很大的变化，由此带来的好处主要有：(1)动目标的多普勒谱被充分压缩，有效避免了多普勒折叠现象，省去了繁琐的谱重建过程；(2)校正了动目标的距离弯曲，由于斜视成像模式距离弯曲较小，在 $v_a \ll v$ 及场景范围不大的情况下可认为整个场景中目标的距离弯曲已被补偿；(3)避免 Keystone 变换后动目标轨迹出现分裂。此时动目标的多普勒中心为

$$f_{dc} = 2 \left(x_n v \cos^2 \theta_0 / R_n - v_r \right) / \lambda = f_{dc0} + M \cdot \text{PRF} \quad (17)$$

其中 $f_{dc0} \in (-\text{PRF}/2, \text{PRF}/2)$ 为基带多普勒中心。此时有

$$\phi(t_m) = 2\pi f_{dc0} t_m (f_r + f_c) / f_c + 2\pi M \cdot \text{PRF} t_m f_r / f_c \quad (18)$$

对式(18)进行 Keystone 变换，即令 $t_m = \tau_m f_c / (f_c + f_r)$ ，代入式(18)有

$$\phi(\tau_m) = 2\pi f_{dc0} \tau_m + 2\pi M \cdot \text{PRF} \tau_m f_r / f_c \quad (19)$$

由于 $f_c \gg f_r$ ，式(19)做了 $f_r / (f_c + f_r) \approx f_r / f_c$ 的近似。从式(19)可以看出，由基带多普勒中心对应的走动分量已经被校正，但是信号中还存在多普勒模糊分量对应的走动分量。此时可以利用参考文献[7]中的方法估计模糊数：利用 Keystone 变换后动目标轨迹与整数倍 PRF 对应的多普勒偏移的线性关系，通过稀疏 Radon 变换实现对模糊数高效搜索，估计出动目标的模糊数。模糊数不同的目标，模糊分量对应的距离走动是不一样的，因此需要逐个加以校正。

求得动目标的模糊数之后构造补偿函数校正模糊分量对应的距离走动

$$H_5 = \exp\left(-j2\pi M \cdot \text{PRF} \tau_m f_r / f_c\right) \quad (20)$$

将信号变换到 2 维时域，进行方位 FFT 得到重聚焦的动目标信号

$$I_{i2}(\hat{t}, f_a; R_n) = \sigma_n \text{sinc}\left(B\left(\hat{t} - \frac{2R_n}{c}\right)\right) \cdot \text{sinc}\left(T_a\left(f_a - \frac{2x_n v \cos^2 \theta_0}{\lambda R_n} + \frac{2v_{rb}}{\lambda}\right)\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} R_n\right) \cdot \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}\left(\Delta r_i - \frac{\Delta r_i v_{rb} v \sin \theta_0}{(v \cos \theta_0 - v_a)^2}\right)\right] \quad (21)$$

其中 T_a 为合成孔径时间。

本文提出的方法处理流程中包含了一次 SAR 信号恢复和两次 SAR 成像处理，比正侧面阵体制下的快速动目标检测流程多进行一次 SAR 恢复和一次 SAR 成像过程，使检测效率低于正侧面阵体制下的 SAR-GMTI 技术。但是正如本文第 3 节所提到的，在前向阵多通道 SAR-GMTI 体制下杂波相消必须在图像域完成，而对快速动目标进行聚焦必须在杂波相消之后，所以动目标信号的 SAR 恢复和再次聚焦是必要的。同时相对于 STAP 方法，本文提出的方法的计算量仍然较小，更容易工程实现。

重聚焦完成后，取对消通道 $I_{12}(t_m)$ 与 $I_{32}(t_m)$ 的干涉相位，利用文献[4]提出的迭代测速方法进行径向速度估计，可估计出基带径向速度 v_{rb} 。根据 v_{rb} 和模糊数可得到目标径向速度

$$v_r = v_{rb} - \lambda M \text{PRF}/2 \quad (22)$$

此时结合式(8)即可得到动目标的真实方位位置，实现动目标的定位。

5 重聚焦算法应用问题分析

本节将对本文提出的重聚焦算法在实际应用中可能遇到的一些问题进行分析并提出相应的解决方法。

动目标重聚焦过程中，对于等效方位速度不为零的动目标，进行方位去斜后，动目标信号仍然具有一定的带宽 B_t ，且有

$$B_t = 2\sqrt{\left[(v - v_a)^2 - v^2\right]} / D_a \quad (23)$$

其中 D_a 为方位向天线长度。因此多普勒中心偏移较大的动目标可能产生折叠现象。不妨设动目标信号初始位置在场景中心点，那么若使动目标信号不发生折叠，动目标的速度需满足不等式

$$\left|\frac{2v_{rb}}{c}(f_c + f_r)\right| + \frac{B_t}{2} \leq \frac{\text{PRF}}{2} \quad (24)$$

利用式(24)及第 6 节的仿真参数,分别画出未进行方位去斜和方位去斜后使动目标信号不折叠的速度区间,如图 3 所示。可见本文提出的方位去斜处理显著扩大了使动目标信号不折叠的速度区间,这意味着动目标发生折叠的可能性大大降低。尤其在等效方位速度较小的情况下,只有极少数的动目标会发生折叠。这将充分减少重建动目标信号的运算量。对于少数仍然发生折叠的动目标信号,可采用文献[6]提出的方法,对动目标信号进行多普勒频移使之不再分裂成两部分,然后再进行徙动校正及方位聚焦等处理。

快速动目标的重聚焦性能在实际应用中会受到各种因素的影响。等效方位速度的存在会导致式(16)的方位去斜函数的失配,正如前文提到的,此时动目标信号仍然具有一定的带宽,使得最后做方位 FFT 后动目标图像展宽,造成方位向散焦^[6]。此时可在方位向上进行自聚焦处理,以得到高质量的目标图像。此外,式(16)用位于场景中心的目标的弯曲校正函数校正整个场景中的动目标距离弯曲,可能会导致弯曲校正后位于场景边缘的动目标信号的残余弯曲超过 1 个距离单元,从而影响 2 维聚焦效果,造成图像 2 维散焦。该问题可以用图像距离向分块的方法解决,分块的要求是分块后在每个子图像中可用同一个校正函数校正所有目标的距离弯曲。

6 仿真分析

为了验证本文提出的方法的有效性,对本文提出的方法进行仿真分析。系统仿真参数为:发射信号载频为 X 波段,发射信号带宽 $B_s = 40$ MHz,信号采样频率 $f_s = 50$ MHz,飞行高度 $H = 8$ km,作

用距离 $R_s = 50$ km。载机飞行速度 $v = 200$ m/s,斜视角为 45° ,方位向天线长度 $D_a = 0.9$ m,脉冲重复周期 $PRF = 400$ Hz,相邻通道天线间距为 0.3 m。距离采样 512 点,方位取全孔径数据。静止场景为均匀排列的点阵,相邻点之间沿 x 轴方向间距为 10 m,沿 y 轴方向间距为 12 m。在场景中设置 3 个快速运动目标 $T1 \sim T3$,其相对场景中心点的 x 轴, y 轴初始坐标及径向速度 v_r ,相对方位速度 v_a 见表 1。杂波和动目标的 RCS 分别为归一化幅值 1 和 0.2。

首先对 3 通道数据进行成像,通道 2 的成像结果如图 4(a)。对 3 通道复图像进行配准及通道间相位偏差补偿后,对通道 1 与通道 2 进行杂波对消,结果如图 4(b)。可见,杂波被有效抑制。但是由于距离徙动和等效方位速度的影响 3 个动目标都存在严重的散焦,降低了信杂噪比,难以检测动目标及进行干涉测速,因此需要对动目标进行重聚焦。

根据本文第 4 节的方法,对杂波对消后的信号恢复方位调制,并进行距离弯曲校正和二次距离脉冲压缩的逆过程后,将动目标信号恢复到距离压缩后的方位时域,此时的动目标轨迹如图 5(a)所示。此时考察动目标的多普勒谱,发现 3 个动目标的谱都发生折叠,其中 $T1$ 的谱如图 5(b)所示。由于折叠的谱分量具有不一样的模糊数,进行 Keystone 变换并变换到方位时域后,如图 5(c),3 个动目标的轨迹均断裂为两部分,且两部分的斜率不一致,这种现象显然会导致动目标在成像时分裂成两个点。采用本文提出的方法,进行方位去斜处理后,如图 5(d)所示, $T1$ 的多普勒谱被有效压缩,不会发生折叠。进行 Keystone 变换后,动目标轨迹如图 5(e),此时

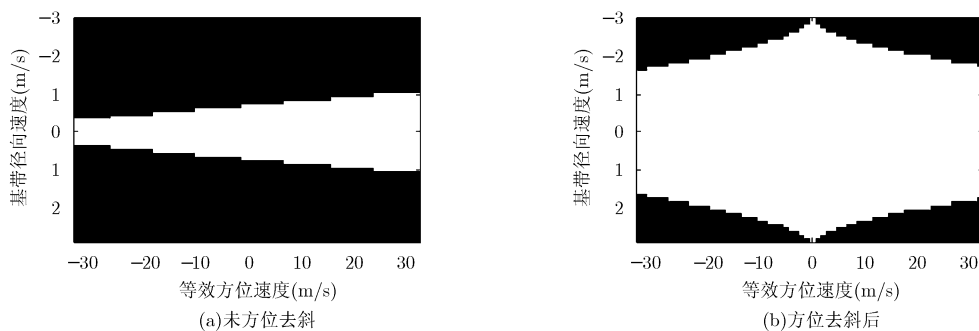


图 3 使动目标信号不折叠的速度区间示意图

表 1 动目标参数及参数估计值

动目标编号	径向速度 v_r (m/s)	等效方位速度 v_a (m/s)	坐标(m)	模糊数	径向速度估计值(m/s)	方位坐标估计(m)
$T1$	-22.5163	0	(-60, -300)	4	-22.5103	-299.5
$T2$	13.6231	3.5161	(0,0)	-2	13.6105	2.0
$T3$	-7.6436	0	(200,300)	1	-7.6381	301.5

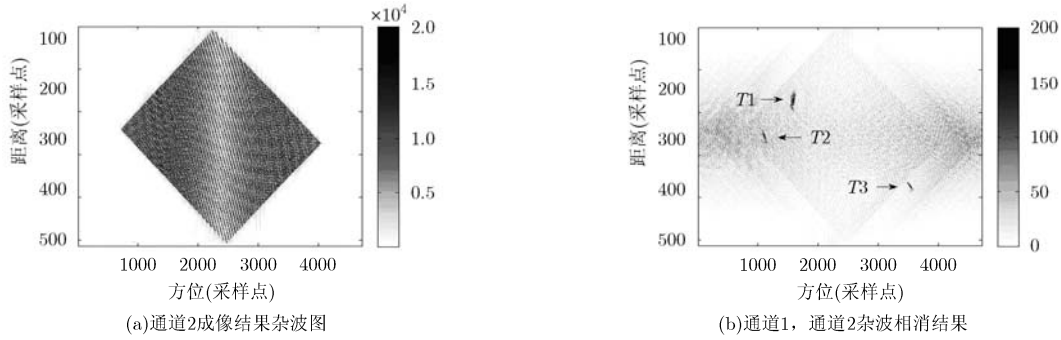


图 4 杂波相消前后结果

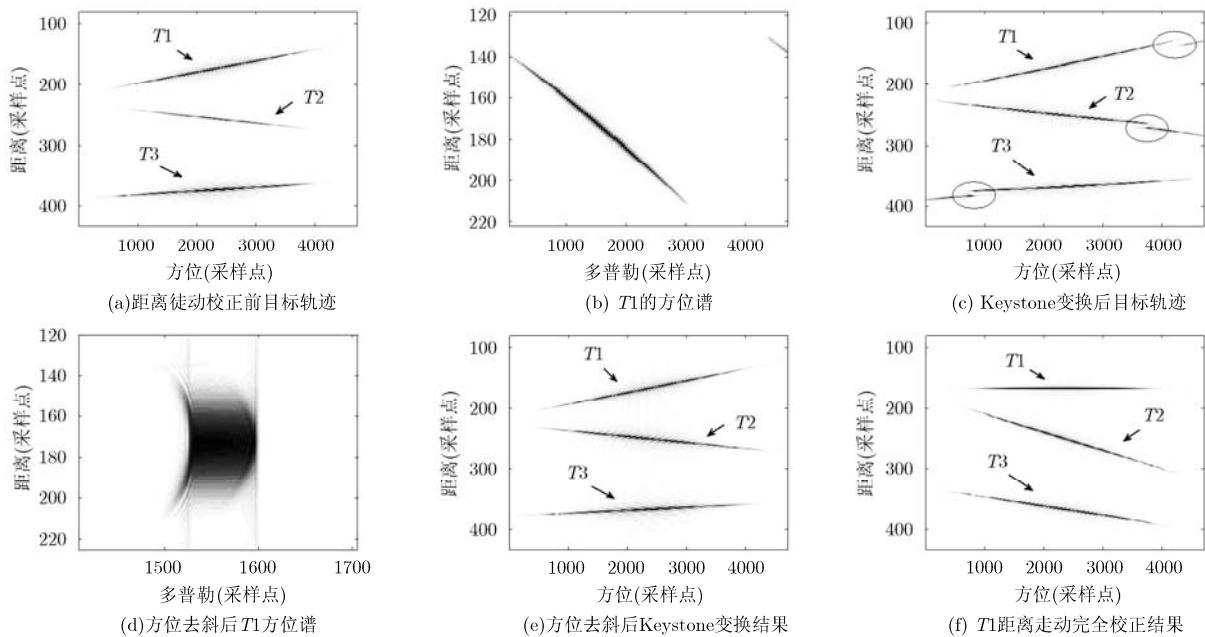


图 5 动目标重聚焦过程

动目标轨迹不会发生分裂。校正模糊数为 4 对应的距离走动后，结果如图 5(f)，可见 $T1$ 轨迹被扳平，距离走动被完全校正。此时通过方位 FFT 即可得到 $T2$ 的重聚焦图像。类似地对不同模糊数对应的距离走动进行校正，可对所有的快速运动目标进行重聚焦。

所有动目标都得到重聚焦后，即可进行动目标检测。为了方便观察杂波抑制及动目标重聚焦的效果，取 $T1$ 和 $T2$ 所在距离门的数据，进行杂波相消前及目标重聚焦前后的对比。如图 6，进行图像相消后，杂波被抑制，但是重聚焦前， $T1$ 和 $T2$ 的能量仅比周围的剩余杂波高出不到 10 dB，几乎被剩余杂波淹没，此时动目标 $T1$ 和 $T2$ 都难以被检测到。进行重聚焦后，由于 $T1$ 的相对方位速度为零，方位向是聚焦的， $T1$ 的能量比周围的剩余杂波高 30 dB 以上，很容易被检测到；动目标 $T2$ 具有相对方位速度，重聚焦后方位向仍然存在散焦，但是信杂比改善了 10 dB 左右，大大增大了检测概率。由以上分析可见，本文提出重聚焦方法能够有效地实现

快速运动目标的重聚焦，大幅提高信杂噪比，从而实现快速运动目标的检测。

检测到动目标之后，进行测速及定位。使用本文提出的测速与定位方法得到各动目标的径向速度及定位位置，如表 1。由表 1 可知 3 个动目标的定位误差都在 1.5 m 以内。可见本文方法可以得到良好的径向速度估计与定位效果。

7 结束语

日益提高的军事需求要求前向阵雷达具备 SAR-GMTI 能力，而适用于前向阵雷达的实用的 SAR-GMTI 方法较少，同时快速运动目标在 SAR 图像上严重的散焦也给检测与定位带来困难。本文针对前向阵 3 通道快速运动目标检测需求，提出了一种在工程上易实现的快速运动目标检测与成像方法。该方法在快速目标重聚焦过程中，避免了多普勒谱折叠带来的问题，有效简化了处理流程。仿真分析证明了该方法的有效性。

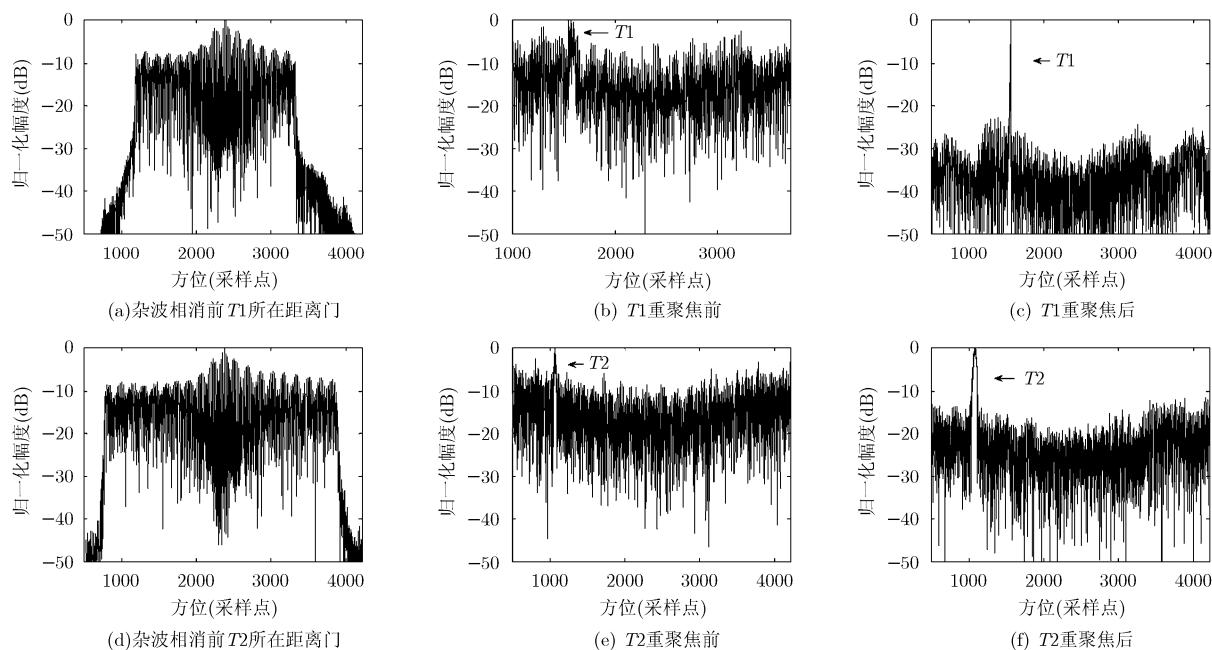


图6 重聚焦前后动目标检测结果对比

参考文献

- [1] Richardson P G and Hayward S D. Adaptive space time processing for forward looking radar[C]. IEEE International Radar Conference, Alexandria: IEEE, 1995: 629-634.
 - [2] Wang Y L, Bao Z, and Peng Y L. STAP with medium PRF mode for non-side-looking airborne radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(2): 609-620.
 - [3] 林幼权, 倪晋麟, 王德纯, 等. 一种新的适用于机载前向阵雷达的动目标检测方法[J]. *电子学报*, 2000, 28(12): 31-33.
Lin You-quan, Ni Jing-lin, Wang De-chun, *et al.* A new moving target detection method for forward-looking airborne radars[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(12): 31-33.
 - [4] 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.
 - [5] Shen Chiu and Dragosevic Marina. An efficient algorithm for fully capturing a ground moving target's energy for spaceborne SAR-GMTI[C]. IEEE Radar Conference, Kansas City, USA, 2011: 288-293.
 - [6] Zhu Sheng-qi, Liao Gui-sheng, and Qu Yi. Ground moving targets imaging algorithm for synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 462-477.
 - [7] Qian J, Lv X, Xing M, *et al.* Motion parameter estimation of multiple ground fast-moving targets with a three-channel synthetic aperture radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(5): 582-592.
 - [8] Yang Jun-gang, Huang Xiao-tao, Jin Tian, *et al.* New approach for SAR imaging of ground moving targets based on a keystone transform[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(4): 829-833.
 - [9] Li G, Xu J, Peng Y, *et al.* Bistatic linear antenna array SAR for moving target detection, location and imaging with two passive airborne radars[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(3): 554-565.
 - [10] Zhang Qun, Yeo Tat-soon, Tan Hwee-siang, *et al.* Imaging of a moving target with rotating parts based on the hough transform[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 291-299.
 - [11] Liu Bao-chang, Wang Tong, and Bao Zheng. Slant-range velocity estimation based on small-FM-rate chirp[J]. *Signal Processing*, 2008, 88(10): 2472-2482.
 - [12] Paulo A C M and Jose M B D. Velocity estimation of fast moving targets using a single SAR sensor[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(1): 75-89.
 - [13] Zhu S Q, Liao G S, Qu Y, *et al.* A new slant-range velocity ambiguity resolving approach of fast moving targets for SAR system[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(1): 432-451.
- 张佳佳: 男, 1986 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像、动目标检测。
周芳: 女, 1987 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像。
孙光才: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像、动目标检测等。
邢孟道: 男, 1975 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为 SAR 成像和目标识别等。
保铮: 男, 1927 年生, 教授, 中国科学院院士, 研究方向为 SAR 成像和空时自适应等。