

# 基于二维速度搜索的星载SAR运动目标聚焦算法研究

闫贺\* 王珏 黄佳 王旭东

(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 210000)

**摘要:** 采用传统SAR成像方法对星载SAR地面运动目标进行成像处理时,运动目标通常会处于散焦状态,导致运动目标检测性能下降。该文结合RD算法,提出一种基于2维速度搜索的星载SAR运动目标检测算法,通过对运动目标距离向速度和方位向速度进行遍历来匹配运动目标多普勒参数,提取不同搜索速度下运动目标的最强幅度值用于恒虚警检测,可以提高运动目标的检测概率。仿真结果验证了该方法的可行性和有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 运动目标检测; RD算法; 速度搜索

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)06-1287-07

DOI: 10.11999/JEIT180663

## A Moving-targets Detection Algorithm for Spaceborne SAR System Based on Two-dimensional Velocity Search Method

YAN He WANG Jue HUANG Jia WANG Xudong

(College of Electronic Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** The moving target component is often defocused in spaceborne SAR images. Therefore, the moving target detection performance is affected depending on the degree of defocusing. Combined with the RD algorithm, a moving-targets detection algorithm for spaceborne SAR based on a two-dimensional velocity search is proposed. Through velocity search on the distance direction and the azimuth direction, the Doppler parameters of possible moving targets can be matched. Then the strongest value among all the searching velocity results for each pixel is used for Constant False Alarm Rate(CFAR) detector. This core process can improve the detection performance of moving target component. Simulation results validate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar(SAR); Moving target detection; RD algorithm; Velocity search

### 1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种可进行高分辨率成像的雷达系统,具有全天时、全天候、远距离等工作特点,已经成为空间对地观测的重要手段<sup>[1,2]</sup>。传统的SAR系统所用回波为目标场景中静止目标的回波后向散射信号,在距离向上发射大时间带宽积的线性调频信号,通过脉冲压缩技术获得距离向高分辨率;在方

向上利用雷达平台和目标之间的相对运动,在一定积累时间内通过信号处理方法对信号进行相关积累,从而获得方位向高分辨率<sup>[3,4]</sup>。作为一种成像雷达, SAR对静止目标的成像技术已经趋于完善和成熟。而在现代战争中,雷达要探测的目标通常是运动着的目标,例如地面的车辆,海上的舰艇等,其他固定目标的回波则视为不需要的杂波,要尽量加以抑制。因而利用SAR进行地面运动目标的检测技术逐渐引起人们的重视。运动目标的检测和成像是现代雷达应该完成的基本功能之一,也成为SAR重要的发展方向<sup>[5]</sup>。

对于星载SAR来说,雷达的视线距离较远,工作时处于下视状态,回波中不可避免地包含了大量的噪声与杂波<sup>[6]</sup>。由于星载SAR雷达载体速度很高,导致杂波多普勒展宽<sup>[7]</sup>,目标可能淹没在杂波当中无法辨别,信噪比与信杂比较低,大大降低了运动目标的检测性能。因此,必须尽可能地改善星

收稿日期: 2018-07-05; 改回日期: 2019-01-20; 网络出版: 2019-02-14

\*通信作者: 闫贺 yanhe@muaa.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61501231), 民用航空“十三五”背景型号预研项目(D010102), 中国博士后科学基金面上资助(2018M630556)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61501231), The Civil Aerospace 13th Five-year Background Model Pre-research Project (D010102), The China Postdoctoral Science Foundation (2018M630556)

载SAR系统的信噪比与信杂比,才能提高运动目标的检测性能。

由于星载SAR是利用雷达与场景之间的相对运动,通过信号处理和运动补偿的方法,得到高的方位向分辨率<sup>[8]</sup>。对静止目标来说,目标和雷达之间的相对速度只是由雷达平台引起,而运动目标由于自身有一定的运动特性,使得运动目标在整个合成孔径内的变化规律与静止目标不同,导致二者的多普勒频率特性存在差异<sup>[9]</sup>。如果使用静止目标的参考函数对运动目标成像,必然会造成运动目标成像质量的下降,出现散焦现象。因此,需要针对运动目标的特性设计相应的成像算法。该成像算法中的关键补偿函数需要知道运动目标的真实速度值,而实际应用中无法提前知道运动目标的真实速度。对此,本文提出一种基于2维速度搜索的星载SAR运动目标检测算法,对运动目标距离向速度和方位向速度进行遍历,尽可能还原运动目标的真实状态,获得最强的信号幅值以便检测。

## 2 运动目标回波信号分析

### 2.1 运动目标回波模型

在典型的星载SAR系统中,目标在合成孔径时间内受到波束的照射并反射回波<sup>[10]</sup>。假设运动目标在合成孔径时间内做匀速直线运动,构建正侧视下运动目标SAR几何关系模型如图1所示。方位0时刻,雷达在位于 $(0, 0, h)$ 处,以速度 $v$ 沿方位向匀速直线运动;运动目标位于 $(x_0, y_0, 0)$ 处,其方位向速度、距离向速度分别为 $v_x$ 和 $v_y$ 。运动目标到雷达飞行航迹的距离记为 $r_0$ ,且满足 $r_0 = \sqrt{h^2 + x_0^2 + y_0^2}$ ,则 $t$ 时刻雷达与运动目标的距离关系表示为

$$r(t) = \sqrt{h^2 + (vt - v_x t - x_0)^2 + (y_0 + v_y t)^2} \quad (1)$$

对式(1)进行泰勒展开

$$r(t) \approx r_0 + \frac{y_0 v_y}{r_0} t - \frac{x_0(v - v_x)}{r_0} t + \frac{(v - v_x)^2}{2r_0} t^2 \quad (2)$$

SAR系统发射信号一般为已知的线性调频信号,根据SAR原理,得到回波信号<sup>[11]</sup>

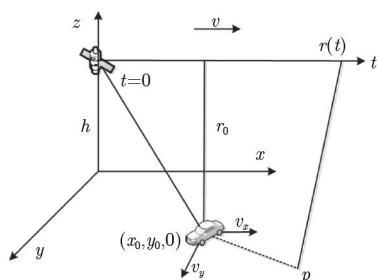


图1 正侧视时,运动目标SAR几何关系图

$$s(t, \tau) = \sigma W_a(t) \text{rect} [\tau - 2r(t)/c] \cdot \exp [-j4\pi r(t)/\lambda] \exp [j\pi K(\tau - 2r(t)/c)^2] \quad (3)$$

其中, $\tau$ 是距离向的快时间变量, $t$ 是方位向的慢时间变量, $\sigma$ 为点目标的后向散射系数, $W_a(t)$ 为方位窗, $K$ 是线性调频脉冲的调频率, $\lambda$ 表示波长, $c$ 为光速。

可以将解调后的基带复信号用匹配滤波的方法进行距离压缩,从而消除2次相位的展宽<sup>[12]</sup>。简化模型,令 $x_0 = 0$ ,距离压缩后的回波信号表示为

$$s(t, \tau) = \sigma W_a(t) \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} r_0 \right\} \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{y_0 v_y}{r_0} t \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{(v - v_x)^2}{2r_0} t^2 \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi K}{c} \frac{y_0 v_y}{r_0} t \tau \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi K}{c} \frac{(v - v_x)^2}{2r_0} t^2 \tau \right\} \cdot \text{sinc} \{ \pi B_r [t - 2r_0/c] \} \quad (4)$$

其中, $B_r$ 表示发射信号带宽。

### 2.2 方位向速度的影响

从式(4)可看出,由于方位速度的存在,运动目标的方位2次相位与静止目标不同,隐含为运动目标与静止目标的多普勒调频率有所区别,这导致了运动目标的方位散焦。多普勒调频率变为

$$K_a = - \frac{2}{\lambda} \frac{(v - v_x)^2}{r_0} \quad (5)$$

其距离弯曲量(Range Curve Migration, RCM)<sup>[13]</sup>也与静止目标有所不同

$$\Delta r_{rcm} = \frac{(v - v_x)^2}{2r_0} t^2 = - \frac{\lambda K_a}{4} t^2 \quad (6)$$

### 2.3 距离向速度的影响

在正侧视模式下静止目标的多普勒中心为0,而运动目标存在多普勒中心偏移,偏移程度与运动目标真实距离向速度成正比

$$f_{dc} = -2y_0 v_y / (\lambda r_0) \quad (7)$$

与静止目标相比,运动目标还引入了一项距离走动项(Range Walk Migration, RWM)<sup>[13]</sup>,即式(4)中第4个指数项,具体的距离走动量为

$$\Delta r_{rwm} = (y_0 v_y / r_0) t \quad (8)$$

### 2.4 距离徙动校正

由式(4)可见,距离向和方位向的耦合没有解除,即存在距离徙动。距离徙动包含距离弯曲和距离走动,则在合成孔径时间内的距离徙动量

$$\Delta r = -\frac{\lambda K_a}{4} t^2 + \frac{y_0 v_y t}{r_0} \quad (9)$$

多普勒中心与距离走动是一对共同变化的参数，因为其均受到回波的方位1次相位影响；多普勒调频率与距离弯曲是一对共同变化的参数，均受到回波的方位2次相位影响。

根据驻定相位原理<sup>[14]</sup>，可以得出方位向慢时间与多普勒频率之间的关系

$$\hat{t} = (f_a - f_{dc}) / K_a \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)从而得到距离徙动量与方位频率的关系

$$\Delta r(f_a) = -\frac{\lambda(f_a - f_{dc})^2}{4K_a} + \frac{2y_0 v_y (f_a - f_{dc})}{2r_0 K_a} \quad (11)$$

可以看出，距离包络中心点的位置是随着方位向频率变化的函数，这说明从方位向来看同一目标的信号落在不同的距离门位置。如果直接对方位向进行匹配滤波，同一目标的能量无法聚焦在多普勒中心，所以在方位向压缩之前必须进行距离徙动校正。这可以通过在距离多普勒域中根据 $\Delta r(f_a)$ 进行距离向插值运算或是相位补偿<sup>[15]</sup>很方便地实现。

经过距离徙动校正后，时域信号变为

$$s(t, \tau) = \sigma W_a(t) \exp[-j4\pi r_0 / \lambda] \exp(j\pi K_a t^2) \cdot \exp(j2\pi f_{dc} t) \operatorname{sinc}\{\pi B_r [\tau - 2r_0 / \lambda]\} \quad (12)$$

此时回波信号为方位向的线性调频信号，即可通过匹配滤波器进行数据的方位聚焦，对运动目标进行成像。

### 3 基于2维速度搜索的RD算法

在实际过程中，雷达对于运动目标的具体运动状态是未知的。对此，采用速度搜索的方法，设计不同均匀间隔的2维数组记为 $v_x(m)$ ， $v_y(n)$ ，其中 $v_x(m)$ 代表第 $m$ 个方位向搜索速度， $v_y(n)$ 代表第 $n$ 个距离向搜索速度，对收到的运动目标回波进行成像处理，提取不同搜索速度下运动目标的最强幅度值，即可相应地提高信噪比与信杂比。[图2](#)给出了基于2维速度搜索的运动目标检测流程图，具体流程如下：

(1) 根据 $v_x(m)$ ， $v_y(n)$ 计算得出搜索速度下的多普勒中心频率 $f_{dc}(n)$ ，多普勒调频率 $K_a(m)$ ；

(2) 距离徙动校正。同一合成孔径内，不同方位但同一距离的目标点的距离弯曲具有相同的频域形式，因此弯曲校正一般都在频域内进行。对距离压缩后的回波进行方位向回波 $s(t, \tau)$ 做方位向傅里叶变换，依据 $f_{dc}(n)$ ， $K_a(m)$ 求解出距离徙动量 $\Delta r(m, n)$ ，再通过插值或者相位补偿算法对距离徙

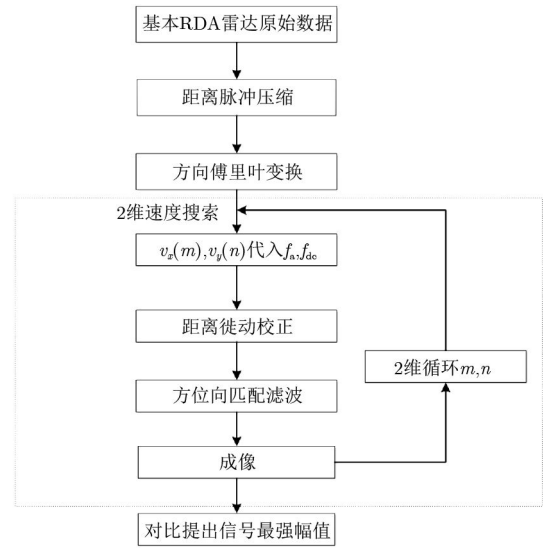


图2 基于2维速度搜索的运动目标检测流程图

动进行校正，将原来每一方位采样点的值更改为 $r_0 + \Delta r(m, n)$ ；

(3) 采用修正后的方位向滤波器对校正后的回波进行方位向匹配并挪位，再经过方位向IFFT将数据变换回方位向时域成像；

(4) 根据遍历，重复步骤(1)—步骤(3)，直到整个设置的2维速度搜索完毕，根据幅度变化曲线，提取信号最强幅度所对应的2维搜索速度逼近运动目标真实运动状态，从而通过2维速度搜索提高运动目标检测性能。

## 4 仿真结果与分析

雷达参数：载机飞行速度7100 m/s，工作频率9.6 GHz，脉冲重复频率4000 Hz，距离采样频率195 MHz，发射脉冲时宽5  $\mu$ s。场景中心斜距850 km，高度600 km。在场景中建立1个运动点目标，4个静止点目标(杂波)，其幅度与运动目标相同。(仿真静止目标回波有两个目的：一是为了观察运动目标不同搜索速度下的静止目标匹配效果；二是用来计算当前运动目标搜索速度下的信杂比。)同时引入高斯噪声，使得静止目标成像时的信噪比为30 dB。

### 4.1 方位向速度的影响

结合实际，将运动目标真实速度均限制在30 m/s以内。[图3](#)给出了在传统SAR静止参数对方位向运动的点目标成像的SNR与SCR，两者变化趋势一致。用静止目标的多普勒参数对运动目标进行聚焦成像，必然会导致运动目标方位向散焦且幅度下降，而杂波没有得到抑制，因而SCR较低，且在一定范围内SNR(SCR)随着目标速度的增大而减小。在运动目标方位向速度为0，即静止时，达到最大。

由此可见，对运动目标聚焦成像需要精确估计出运动目标的多普勒参数，在实际操作中可以通过方位向搜索速度 $v_x(m)$ 来逼近。散焦严重时，会导致多峰的出现。若是仍采用运动目标中心位置来检测信号，SNR(SCR)变化曲线会出现起伏现象。为进一步提高信号的检测性能，提取不同搜索速度下的最强幅值进行检测。

假设运动目标真实方位向速度为5 m/s，图4给出了不同方位向搜索速度 $v_x(m)$ 下的提取信号最强幅值的性能曲线。其中横坐标 $\Delta v_x$ 为方位向搜索速度偏离运动目标真实方位向速度的程度。可见， $\Delta v_x=0$ 时，SNR=30 dB，达到最大，且SNR随着偏移程度的增大而一致减小。此时，随着 $\Delta v_x$ 增

大，杂波散焦程度更为严重，故而SCR与SNR的规律变化不同。当 $|\Delta v_x|=7$  m/s时，SNR下降约1 dB，而此时SCR下降也约在1 dB范围内，故在该系统参数下，对方位向搜索速度 $v_x(m)$ 选择的最大搜索间隔不宜超过7 m/s。

#### 4.2 距离向速度的影响

为检验目标的聚焦效果，不考虑噪声情况下对目标进行插8倍值处理，得到运动目标成像切片。由图5、图6可得，运动目标距离向速度的存在不影响运动目标的聚焦成像，但是会引起运动目标回波信号的多普勒中心频率的变化，从而使得运动目标在方位向偏离真实位置，偏移量与 $v_y$ 成正比。

图7给出了真实运动目标距离向速度为5 m/s

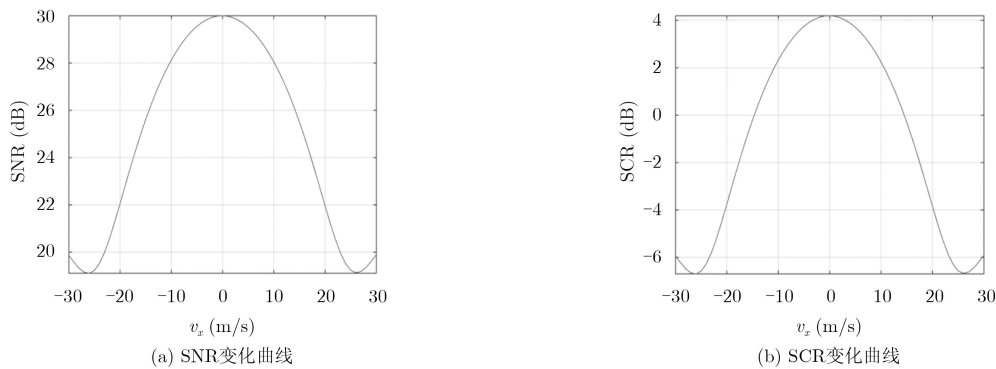


图3 静止参数下方位向运动目标性能曲线

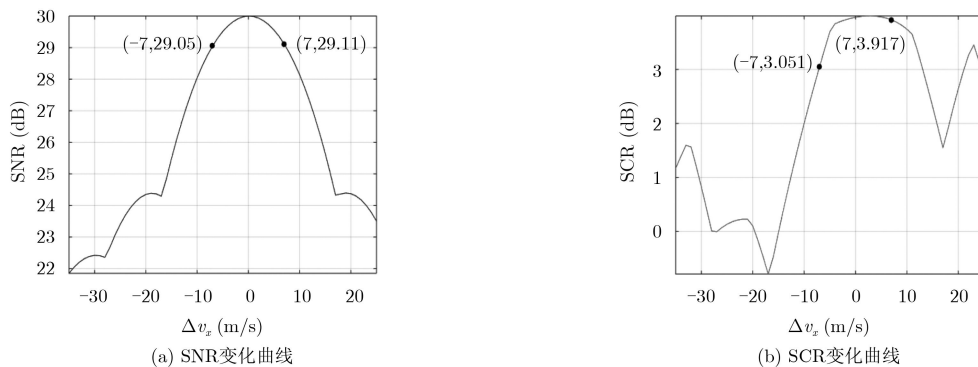


图4 不同方位向搜索速度 $\Delta v_x(m)$ 下的性能曲线

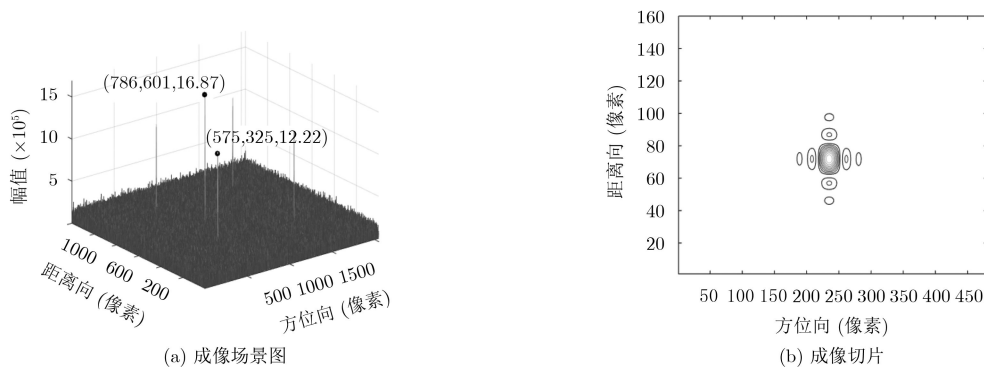


图5 距离向速度为5 m/s的运动目标在静止参数下的成像



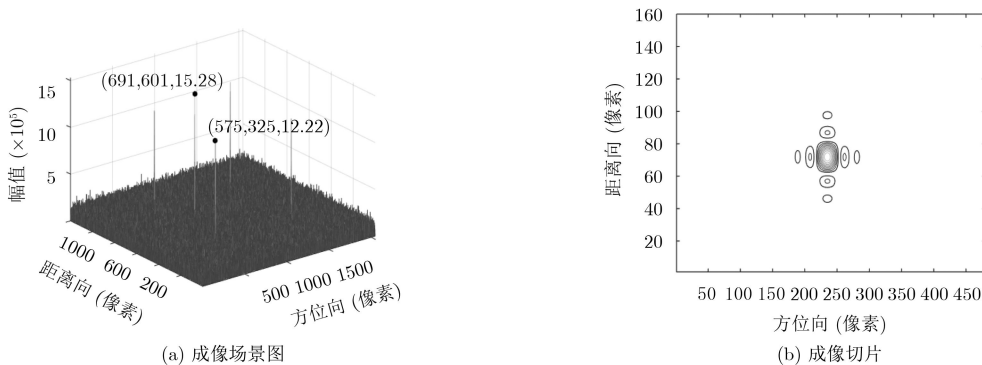


图6 距离向速度为7 m/s的运动目标在静止参数下的成像

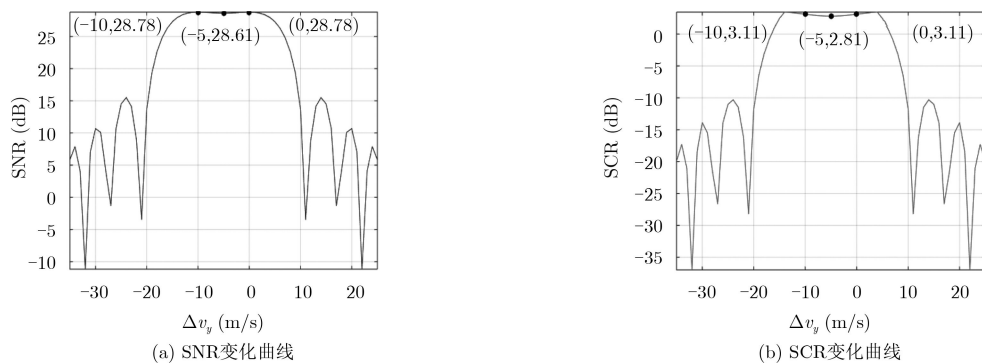


图7 不同距离向搜索速度 $v_y(n)$ 下的性能曲线

时，运动目标在不同距离向搜索速度 $v_y(n)$ 下的性能曲线。其中横坐标 $\Delta v_y = v_y(n) - v_y$ 为距离向搜索速度偏离运动目标真实距离向速度的程度。距离向速度仅对距离走动产生影响，由式(11)可得

$$\Delta r_{\text{rwm}}(f_a) = \frac{y_0 v_y (f_a - f_{\text{dc}})}{r_0 K_a} \quad (13)$$

结合式(7)，则在距离向速度搜索下

$$\Delta r'_{\text{rwm}}(f_a) = \frac{y_0 (v_y + \Delta v_y) \left[ f_a - \frac{2y_0}{\lambda r_0} (v_y + \Delta v_y) \right]}{r_0 K_a} \quad (14)$$

可见 $\Delta r'_{\text{rwm}}(f_a)$ 是 $\Delta v_y$ 的2次函数，且近似以 $-v_y$ 为中心。当 $\Delta v_y = -v_y$ 时， $\Delta r'_{\text{rwm}}(f_a) = 0$ ，相当于完全没有对距离走动进行处理，因而此处SNR(SCR)存在凹陷现象。由于运动目标方位向上的成像偏移，即使 $\Delta v_y = 0$ ，采样点不一定出现在信号幅值最大处，从而SNR达不到30 dB，甚至当距离向搜索速度偏离程度较大时，因为采样问题而出现曲线出现起伏现象。

从信号分析来看，由于距离向速度带来的运动目标成像方位向的移动，方位向采样存在偏差，无法获得最大值，导致信号幅值的下降。为尽可能提高信号幅值，考虑修正方位向匹配滤波器

$$H'_a(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \exp\{-j\pi K_a(m)t^2\} \cdot \exp\{-j2\pi f_{\text{dc}}(n)t\} \quad (15)$$

其中， $T_a$ 表示合成孔径时间。

图8给出了修正方位向匹配滤波器的情况下，运动目标在不同距离向搜索速度 $v_y(n)$ 下的SNR变化曲线。对杂波来说，修正方位向匹配滤波器会导致杂波信号也出现挪位现象，幅度的严重下降，因而在此对SCR不予讨论。由图8可得，修正方位向匹配滤波器后，保证了在 $\Delta v_y = 0$ 时，运动目标成像位置固定，SNR=30 dB。距离向速度引入了距离走动，距离走动对运动目标检测性能的影响要大

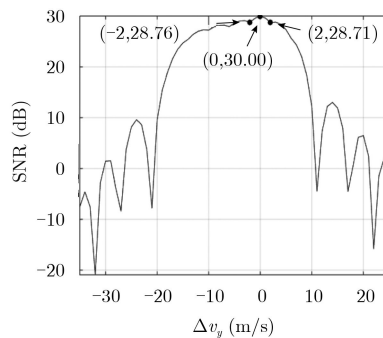


图8 修正方位向匹配滤波下，不同距离向搜索速度 $v_y(n)$ 下的SNR变化曲线

于距离弯曲。对比图4，偏离程度大于一定值(一定的偏离程度才产生1个距离门的走动)时， $\Delta v_x$ 与 $\Delta v_y$ 取相同值，距离向速度搜索下的SNR值明显小于方位向速度搜索下的SNR，不同距离向搜索速度下的SNR曲线较为陡峭，故SNR对距离向搜索速度 $v_y(n)$ 更为敏感。当 $|\Delta v_y|=2$  m/s时，SNR下降约1 dB。因此，对于距离向搜索速度 $v_y(n)$ ，在此系统参数下选择最大的搜索间隔不宜超过2 m/s。

### 4.3 2维速度搜索

设运动目标真实方位向速度为9 m/s，距离向速度为4 m/s，按照前文第3节的叙述对运动点目标进行仿真。由于现实中雷达对于运动目标的具体运动状态是未知的，考虑到计算量的问题，结合方位

向速度和距离向速度各自的影响以及实际运动目标的速度问题，设计具体2维速度搜索范围如式(16)

$$\left. \begin{aligned} v_x(m) &= -28, -14, -7, 0, 7, 14, 28 \\ v_y(n) &= -30, -28, \dots, -2, 0, 2, \dots, 28, 30 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

对此，讨论以下3种情况下的失配： $(v_x(m), v_x(m)) = (7, 4)$ 时，与运动目标真实速度失配程度最轻； $(v_x(m), v_x(m)) = (0, 8)$ 时，失配程度有所增加； $(v_x(m), v_x(m)) = (-14, 10)$ 时，严重失配。

对比图9，完全匹配下运动目标成像被准确挪到场景中心位置，信号幅值最强。而图9(b)、图9(c)、图9(d)随着失配程度的增加，运动目标的信号幅值逐渐下降，在方位向上(x轴)仍存在一定偏移。

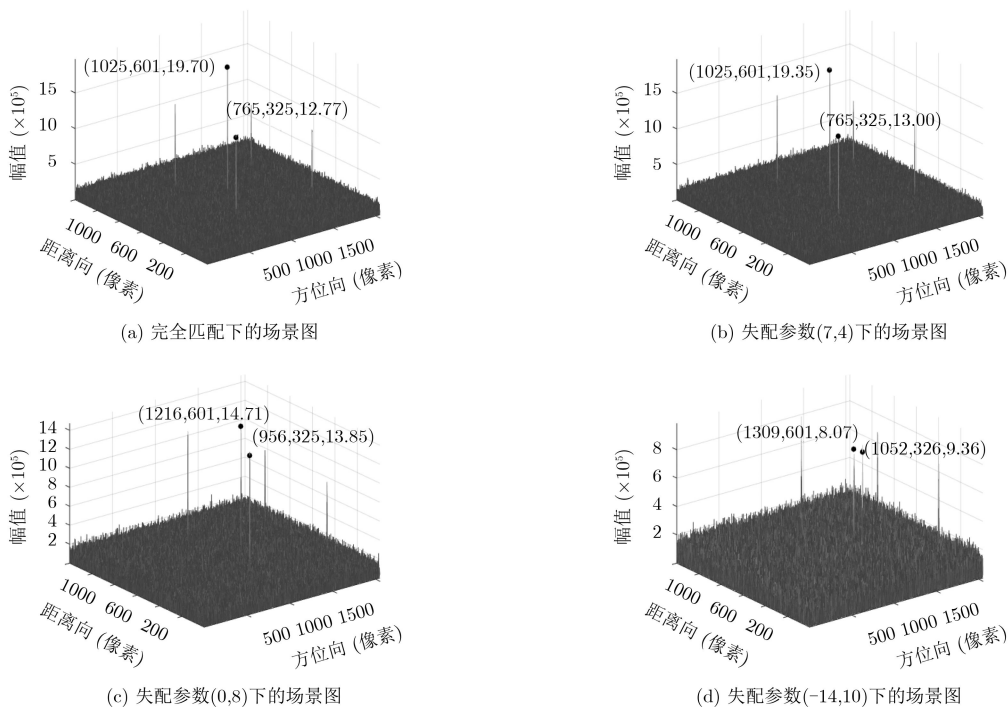


图9 不同匹配参数下的运动目标成像场景图

表1给出了不同参数下，运动目标成像的SNR和SCR。 $(v_x(m), v_x(m)) = (7, 4)$ 情况下与运动目标真实状态接近，所以检测性能也较为接近。 $(v_x(m), v_x(m)) = (-14, 10)$ 情况下的SNR和SCR均出现明显的下降。因此，可以通过2维速度搜索来提高运动目标的检测性能。

## 5 结论

本文结合基本的RD算法，首先分析了在静止

参数下距离向和方位向速度对运动目标聚焦成像各自的影响。成像结果显示，方位向速度会引起散焦现象且幅值下降，方位向速度越大，现象越明显。距离向速度会引起成像位置的偏移，偏移量与距离向速度成正比，导致方位向采样点不再是原来的最大值，因而幅值也存在下降的现象。因此，为尽可能提取信号最强幅值，对方位向匹配滤波器进行了修正。经研究发现，距离向速度和方位向速度对运动目标检测性能的敏感程度不同，因而进一步对距离向速度和方位向速度采用不同的搜索间隔，以提高运动目标的检测概率的同时减少计算量。仿真结果验证了该方法的可行性和有效性。本文提出的运动目标聚焦算法可以直接用SAR回波数据，也可以用于常规杂波抑制算法,如单通道频域滤波法，多

表1 不同参数下，运动目标成像性能分析

不同参数	完全匹配(9,4)	失配(7,4)	失配(0,8)	失配(-14,10)
SNR (dB)	30.00	29.92	27.35	21.17
SCR (dB)	3.75	3.41	0.67	-2.26

通道偏置相位中心天线技术(DPCA)、杂波抑制干涉(CSI)、空时自适应处理(STAP)等之后的数据。

### 参 考 文 献

- [1] 李春升, 王伟杰, 王鹏波, 等. 星载SAR技术的现状与发展趋势[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(1): 229–240. doi: [10.11999/JEIT151116](https://doi.org/10.11999/JEIT151116).
- LI Chunsheng, WANG Weijie, WANG Pengbo, *et al.* Current situation and development trends of spaceborne SAR technology[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(1): 229–240. doi: [10.11999/JEIT151116](https://doi.org/10.11999/JEIT151116).
- [2] 韦北余, 朱岱寅, 吴迪. 一种基于动目标聚焦的SAR-GMTI方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(7): 1738–1744. doi: [10.11999/JEIT151036](https://doi.org/10.11999/JEIT151036).
- WEI Beiyu, ZHU Daiyin, and WU Di. A SAR-GMTI approach based on moving target focusing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(7): 1738–1744. doi: [10.11999/JEIT151036](https://doi.org/10.11999/JEIT151036).
- [3] ENTZMINGER J N, FOWLER C A, and KENNEALLY W J. JointSTARS and GMTI: Past, present and future[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(2): 748–761. doi: [10.1109/7.766956](https://doi.org/10.1109/7.766956).
- [4] ZHENG Hongchao, WANG Junfeng, and LIU Xiaozhao. Motion parameter estimation for multichannel SAR-GMTI systems[C]. 2016 CIE International Conference on Radar (RADAR), Guangzhou, China, 2016: 1–4. doi: [10.1109/RADAR.2016.8059542](https://doi.org/10.1109/RADAR.2016.8059542).
- [5] 郑明洁. 合成孔径雷达动目标检测和成像研究[D]. [博士论文], 中国科学院电子学研究所, 2003: 6.
- [6] HUANG Yan, LIAO Guisheng, XU Jingwei, *et al.* GMTI and parameter estimation via time-Doppler chirp-varying approach for single-channel airborne SAR system[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(8): 4367–4383. doi: [10.1109/TGRS.2017.2691742](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2691742).
- [7] WANG Yu, CAO Yunhe, PENG Zhigang, *et al.* Clutter suppression and moving target imaging approach for multichannel hypersonic vehicle borne radar[J]. *Digital Signal Processing*, 2017, 68: 81–92. doi: [10.1016/j.dsp.2017.05.010](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2017.05.010).
- [8] YAN He, ZHU Daiyin, WANG R, *et al.* Practical signal processing algorithm for wide-area surveillance-GMTI mode[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(8): 991–998. doi: [10.1049/iet-rsn.2014.0452](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2014.0452).
- [9] ZHANG Xuepan, LIU Lu, and ZHANG Xuejing. Parameterized pseudo-localization for accurate and efficient moving targets imaging in synthetic aperture radar[J]. *Sensors*, 2017, 17(8): 1714. doi: [10.3390/s17081714](https://doi.org/10.3390/s17081714).
- [10] LIU Congfeng and LIAO Guisheng. Canonical framework for multi-channel SAR-GMTI[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2008, 19(5): 923–928. doi: [10.1016/S1004-4132\(08\)60176-0](https://doi.org/10.1016/S1004-4132(08)60176-0).
- [11] YANG Jian. SAR ground moving target indication and imaging theory[M]. YANG Jian. Study on Ground Moving Target Indication and Imaging Technique of Airborne SAR. Singapore, Springer, 2017: 13–32. doi: [10.1007/978-981-10-3075-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3075-8_2).
- [12] WANG Xinyun, DENG Bin, WANG Hongqiang, *et al.* Ground moving target imaging based on motion compensation for circular SAR[C]. Proceedings of the 9th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT), Chengdu, 2017: 372–377. doi: [10.1109/ICAIT.2017.8388948](https://doi.org/10.1109/ICAIT.2017.8388948).
- [13] 林晨晨, 黄普明, 李渝. 多通道SAR-GMTI技术的研究进展[J]. 电讯技术, 2017, 57(1): 118–126. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2017.01.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2017.01.020).
- LIN Chenchen, HUANG Puming, and LI Yu. Research progress in multichannel SAR-GMTI[J]. *Telecommunication Engineering*, 2017, 57(1): 118–126. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2017.01.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2017.01.020).
- [14] MAKHOUL E, BROQUETAS A, RODON J R, *et al.* A performance evaluation of SAR-GMTI missions for maritime applications[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(5): 2496–2509. doi: [10.1109/TGRS.2014.2360989](https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2360989).
- [15] LV Gaohuan, WANG Junfeng, and LIU Xingzhao. Ground moving target indication in SAR images by symmetric defocusing[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(2): 241–245. doi: [10.1109/LGRS.2012.2200232](https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2200232).

闫 贺: 男, 1985年生, 副教授, 研究方向为合成孔径雷达信号处理。

王 珏: 女, 1994年生, 硕士生, 研究方向为合成孔径雷达信号处理。

王旭东: 男, 1979年生, 副教授, 研究方向为雷达信号处理及硬件实现。