

## 星载多通道高分辨率宽测绘带 SAR 系统运动目标检测方法

吴明宇\* 杨桃丽 吴顺君 李真芳  
(西安电子科技大学雷达信号重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 该文针对星载多通道高分辨率宽测绘带合成孔径雷达系统, 提出一种新的运动目标检测方法。该方法首先利用波束形成方法进行杂波抑制, 然后对运动目标的斜距历程进行拟合得到运动目标的运动方向。接着对杂波抑制后的数据进行聚焦处理, 得到模糊的运动目标图像, 并利用恒虚警检测技术检测得到所有的模糊运动目标。最后根据模糊图像的空间关系和估计出的运动方向检测出真实目标。星载仿真数据验证了该方法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 运动目标检测(GMTI); 高分辨率宽测绘带(HRWS); 多普勒模糊

中图分类号: TN957.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)02-0441-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00465

## Ground Moving Target Indication for Spaceborne Multi-channel High Resolution Wide Swath SAR System

Wu Ming-yu Yang Tao-li Wu Shun-jun Li Zhen-fang

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** A method of Ground Moving Target Indication (GMTI) for spaceborne multi-channel High Resolution Wide Swath (HRWS) Synthetic Aperture Radar (SAR) system is presented. Firstly, the method utilizes beamforming for clutter suppression, then estimates moving target direction by fitting for the slant range of the moving target. Secondly, focusing for the clutter suppressed data is performed to obtain ambiguous images of the moving target, then all ambiguous moving targets are obtained by Constant False Alarm Rate (CFAR) detection technology. Finally, this method detects real targets according to the spatial relationships of fuzzy images and motion direction estimated. The spaceborne HRWS simulation data verifies the validity of the proposed method.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR); Ground Moving Target Indication (GMTI); High Resolution Wide Swath (HRWS); Doppler ambiguity

### 1 引言

同时获取高分辨率宽测绘带(HRWS)合成孔径雷达(SAR)图像并进行地面运动目标检测(GMTI)是合成孔径雷达成像的发展趋势。然而传统单通道星载 SAR 系统受最小天线面积的限制<sup>[1]</sup>, 为得到宽距离测绘带而不产生距离模糊要求脉冲重复频率不能太高, 而高方位分辨率又要求系统以高脉冲重复频率工作, 因此难以同时获取方位高分辨和距离宽测绘带。结合数字波束形成技术(DBF), 多通道 SAR 系统可以突破这一限制<sup>[2,3]</sup>。对于多通道 SAR/GMTI 系统来说, 现有的大多数文献均在假设单通道系统参数满足最小天线面积限制的前提下进行运动目标检测及参数估计<sup>[4-10]</sup>, 未考虑回波信号的模糊。文献[11]提出了在多普勒模糊的前提下利用空时自适应信号处理(STAP)进行杂波抑制的方法, 但并未说

明运动目标如何检测。本文针对以上问题, 在存在多普勒模糊的情况下, 详细讨论了如何利用多通道 SAR 系统进行运动目标检测, 并利用星载仿真数据验证了本文算法的有效性。

### 2 回波特征

我们知道, 地面固定杂波的多普勒频率  $f_d$  与波束锥角  $\phi$  的正弦值存在如下线性关系<sup>[12]</sup>:

$$f_d(\phi) = \frac{2v_s}{\lambda} \sin \phi \quad (1)$$

其中  $v_s$  为卫星速度,  $\lambda$  为工作波长。对于星载地面运动目标检测来说, 由于卫星速度极快, 其天线主波束扫过地面运动目标的时间极短, 可认为在此期间地面运动目标的速度基本没变化, 并且运动目标沿航向的速度分量远远小于卫星速度, 同时因为方位波束很窄, 运动目标速度沿视线方向的变化很小<sup>[11]</sup>, 因此本文只考虑运动目标沿视线方向的速度  $v_t$ 。由于沿视线方向速度的存在, 使得运动目标的多普勒谱相对同方向的固定杂波有一偏移量, 如式

2013-04-08 收到, 2013-11-15 改回

国家自然科学基金(41001282, 40871205)资助课题

\*通信作者: 吴明宇 inhurry@163.com

(2)所示,也可以认为是对于同一多普勒单元,运动目标回波谱所对应的锥角与固定杂波不同,

$$f_{t,d}(\phi) = \frac{2v_s}{\lambda} \sin \phi + \frac{2v_t}{\lambda} = \frac{2v_s}{\lambda} \sin \phi + \Delta f_{t,d} \quad (2)$$

其中  $\Delta f_{t,d} = 2v_t/\lambda$  表示多普勒频谱偏移。当不存在多普勒模糊时,多普勒值与锥角的正弦值在空时平面上表现为一条直线,如图 1(a)所示,由于运动目标附加的多普勒分量使其与固定杂波的空时 2 维谱相分离,图中粗斜直线为固定杂波的回波谱,细斜直线为运动目标的回波谱。由于运动目标沿航向速度与卫星速度相比小得多,其空时 2 维谱在图 1 中表现为粗、细直线的斜率相同<sup>[11]</sup>。在高分辨率宽测绘带 SAR 系统中,通常发射低脉冲重复频率  $f_p$  的信号保证距离不模糊,由此每一个通道接收的回波都发生了多普勒模糊,如图 1(b)所示。

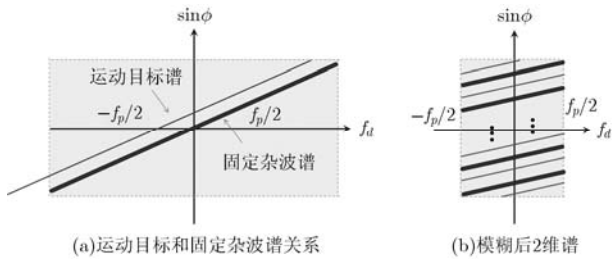


图 1 固定杂波和运动目标的空时 2 维谱

### 3 运动目标检测

#### 3.1 成像特征

在方位多普勒频域构造方位匹配函数为<sup>[12,13]</sup>

$$H_{az}(f_d) = \exp\left[-j\pi \frac{f_d^2}{K_d}\right] \quad (3)$$

其中  $K_d = 2v_s^2/(\lambda R)$  为多普勒调频率,  $R$  为最近斜距。利用上述匹配函数,目标被压缩至零多普勒时刻。例如,运动目标的多普勒历程为

$$f_{t,d}(t) = \frac{2v_s}{\lambda} \sin \phi + \frac{2v_t}{\lambda} = -K_d t + \frac{2v_t}{\lambda} \quad (4)$$

其中  $t$  为方位慢时间。利用式(3)所示的匹配函数进行方位压缩后,运动目标的方位成像位置  $x_0$  为

$$x_0 = \frac{2v_t}{\lambda K_d} v_s \quad (5)$$

当回波信号的多普勒频谱发生模糊时,成像后的方位位置为

$$x_k = \left(\frac{2v_t}{\lambda} + kf_p\right) \frac{v_s}{K_d} \quad (6)$$

其中  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , 也就是说成像后目标发生了模糊,相邻两个模糊目标沿方位相距  $f_p v_s / K_d$ , 如图 2 所示,图中假设回波信号的多普勒模糊数为 3,这

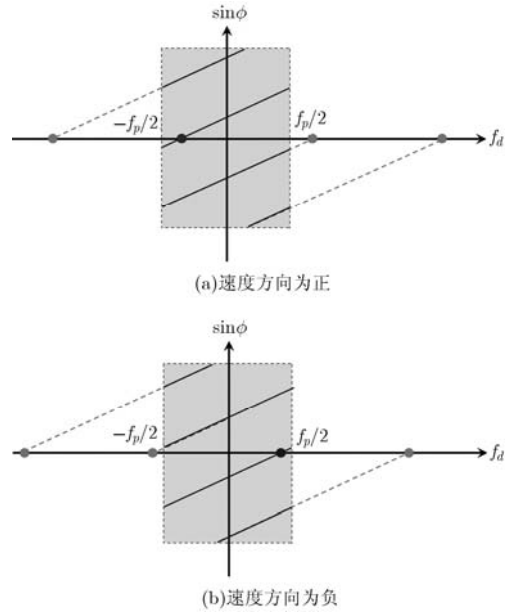


图 2 运动目标的成像位置示意图

里多普勒模糊数定义为回波信号的主多普勒带宽与脉冲重复频率的比值。从图 2 中可以看出,如果多普勒模糊数为  $N$ ,则利用式(3)所示的匹配函数进行成像后,可得到  $N + 1$  个成像目标,包括 1 个真实目标和  $N$  个虚假模糊目标。目标的真实成像位置由其运动方向决定,当运动目标的速度方向为正,即沿视线方向远离雷达时,则从左到右第  $(N - 1)/2 + 1$  个目标即为真实目标,如图 2(a)所示,其中从左到右第 2 个实心圆表示真实目标,其它实心圆表示虚假模糊目标;当运动目标的速度方向为负,即沿视线方向靠近雷达时,则从左到右第  $(N+1)/2 + 1$  个目标即为真实目标,如图 2(b)所示,其中从左到右第 3 个实心圆表示真实目标,其它实心圆表示虚假模糊目标。

#### 3.2 目标检测

在进行运动目标检测前首先应进行杂波抑制。采用文献[11]所述的波束形成方法,在理想情况下,阵列主波束指向运动目标谱分量,而在所有杂波谱分量方向形成波束零点。需要说明的是,由于阵列自由度的限制,没有必要也不可能保证取出的运动目标谱也是非模糊的。假设多普勒模糊次数为 3,运动目标个数为 2,若要保证取出的运动目标谱是无模糊的,则一共需要约束 9 个方向,而在实际场景中运动目标的个数常常不止 2 个,而且也无法事先知道运动目标的速度,也就无法准确地对运动目标谱进行约束。实际上,只须保证固定杂波谱分量被抑制即可。为避免运动目标的谱分量落入波束模式的凹口中,可通过阵列搜索来约束运动目标的导

向矢量, 然而这样会大大地增加运算量。在实际操作中, 可以任意假设运动目标的导向矢量, 然后再进行杂波抑制, 实验证明, 对于大多数目标来说, 这样操作只会造成一定的能量损失, 但并不影响后续的目标检测。当然, 如果选取的导向矢量使得运动目标的能量受到较大损失, 则后续操作将受到较大影响。

杂波抑制后, 若直接对回波数据进行成像处理, 由于多普勒模糊将得到多个虚假模糊目标。3.1 节表明这些虚假目标相邻之间沿方位向相距  $f_p v_s / K_d$ , 目标的真实成像位置由其运动方向决定。基于此, 可根据成像目标间的相对位置对所有目标进行分类, 从而得到运动目标的所有成像目标, 然后再根据其运动方向检测出运动目标的真实成像位置, 完成目标检测。现在唯一未知的即是运动目标的运动方向。下面将给出如何估计运动目标的运动方向。

运动目标的瞬时斜距为

$$R(t) = \sqrt{(R_0 + v_t t)^2 + (v_s (t - t_0))^2} \quad (7)$$

其中  $R_0$  为雷达开始工作时刻运动目标离雷达平台的最近斜距,  $t_0$  表示运动目标的零多普勒时刻。对式(7)在  $t_0$  处进行泰勒展开得

$$R(t) \approx R_0 + v_t t_0 + v_t (t - t_0) + \frac{(v_t^2 + v_s^2)(t - t_0)^2}{2(R_0 + v_t t_0)} \quad (8)$$

可以看出式(8)的一次项系数即为目标运动速度, 因此可通过对运动目标的斜距历程进行二次拟合估计得到运动目标的速度。需要说明的是, 因只需估计得到运动目标的运动方向, 故对  $R(t)$  和  $t_0$  的精度要求不高, 其中  $R(t)$  可通过对杂波抑制距离压缩后的数据进行提取得到,  $t_0$  可假设为数据录取的中间时刻, 这里的时刻均指相对时刻。实验证明, 以上近似均可正确估计得到运动目标的运动方向。

### 3.3 处理步骤

下面给出利用本文方法进行运动目标检测的具体处理步骤, 如图 3 所示。

- (1) 结合各通道回波进行杂波抑制;
- (2) 对杂波抑制后的数据进行距离压缩;
- (3) 利用距离压缩后的数据提取出各运动目标的斜距位置, 得到  $R(t)$ ;
- (4) 根据式(8)对目标斜距进行拟合, 估计得到其一次项系数, 从而得到运动目标的运动方向;
- (5) 利用式(3)所示的方位匹配函数, 对距离压缩

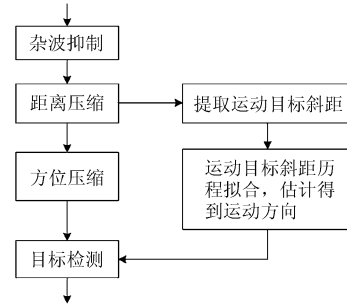


图3 运动目标检测流程图

后的数据进行方位压缩, 得到模糊的 SAR 图像;

(6) 利用恒虚警检测(CFAR)技术<sup>[14]</sup>检测得到所有目标, 包括模糊目标和真实目标, 然后根据各目标间的相对位置关系, 得到属于同一目标的所有模糊目标, 最后结合第(5)步中得到的运动目标运动方向, 检测出真实目标。

## 4 实验验证

下面通过星载仿真数据来验证本文方法。仿真参数如表 1 所示, 天线沿方位向均匀划分为 6 个独立接收通道, 即每个接收通道的方位向尺寸为 2 m, 回波信号发生 3 次多普勒模糊。场景中包含 3 个运动目标, 沿视线方向速度分别为 12.8 m/s, 9.6 m/s 和 -12.8 m/s, 信杂噪比为 0 dB。以场景中心为坐标原点, 雷达运动方向为 X 轴, Z 轴垂直地面向上, 与 Y 轴构成右手坐标系, 运动目标的坐标位置分别为 (1478, 0, 0) m, (0, 0, 0) m, (-1478, 108, 0) m, 其中, 目标 1 和目标 2 位于同一距离单元。

图 4(a) 给出利用 6 个通道的回波数据进行杂波多普勒解模糊后的成像结果, 从图中无法判断出何为运动目标。图 4(b) 给出了利用 6 个通道进行杂波抑制距离压缩后的结果, 在进行杂波抑制时, 阵列主波束指向  $f_p/2$  所对应的锥角方向, 未进行波束扫描搜索, 图右侧分别为对应左侧两个方框内的放大图。图 4(c) 给出了进行方位压缩后的成像结果, 图中实线小圆圈标注的为检测出的真实动目标, 虚线小圆圈标注的为对应的虚假动目标。根据仿真参数, 可以计算出同一目标的相邻虚假目标沿方位向相距 3263.8 m, 对应 SAR 图像中相距 1088 个采样单元, 与动目标实际检测结果相一致。从图中可以看出, 本文方法在较低运算量的情况下很好地实现了运动目标检测。

表 1 仿真参数

轨道高度	下视角	波长	天线尺寸	通道数	卫星速度	PRF	杂噪比
500 km	40°	0.03 m	12 m × 1 m	6	7616.4 m/s	2539 Hz	30 dB

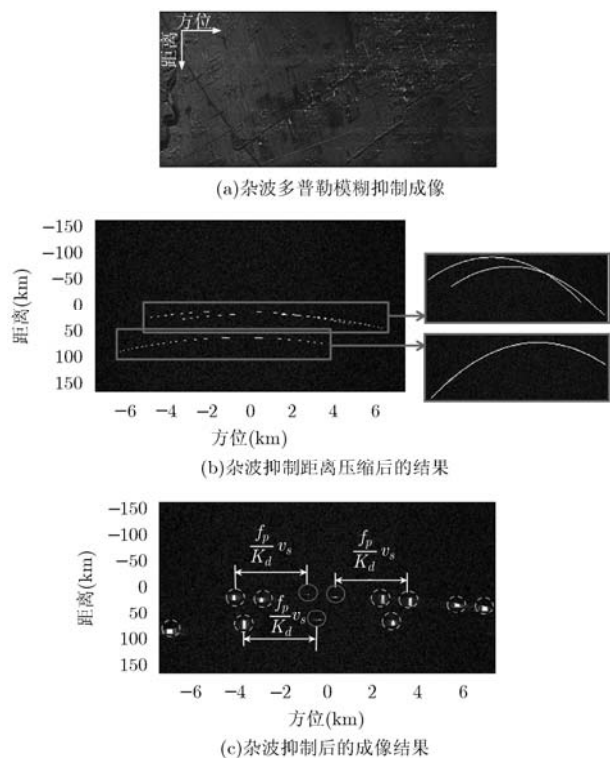


图4 运动目标检测结果

## 5 结论

未来合成孔径雷达系统要求同时获取高分辨率宽测绘带 SAR 图像并进行运动目标检测,在此条件下,若要保证距离无模糊则各个通道的回波均存在多普勒模糊。然而现有的大多数文献均在假设单个通道系统满足最小天线面积的前提下进行运动目标检测,未考虑回波信号的多普勒模糊。本文针对以上情况,利用星载多通道高分辨率宽测绘带 SAR 系统,在存在多普勒模糊的前提下,提出一种运动目标检测方法。该方法首先利用波束形成进行杂波抑制,再对目标的斜距历程进行拟合得到运动目标的运动方向。然后进行聚焦处理,提高运动目标的相干积累时间,得到模糊的 SAR 图像。最后根据多普勒模糊关系和运动方向从模糊的运动目标中判断出真实目标。星载仿真实验证明了该方法的有效性。

## 参考文献

- [1] Freeman A, Johnson W T K, Huneycutt B, *et al.* The "myth" of the minimum SAR antenna area constraint[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(1): 320-324.
- [2] Currie A, and Brown M A. Wide-swath SAR[J]. *IEEE Proceedings-F*, 1992, 139(2): 122-135.
- [3] Gebert N, Krieger G, and Moreira A. Digital beamforming on receive: techniques and optimization strategies for high-resolution wide-swath SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 564-592.
- [4] Ender J. Detection and estimation of moving target signals by multi-channel SAR[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 1996, 50(2): 150-156.
- [5] Guo B, Vu D, Xu L, *et al.* Ground moving target indication via multichannel airborne SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3753-3764.
- [6] 张佳佳, 周芳, 孙光才, 等. 基于前向阵雷达的三通道地面快速运动目标检测与成像方法[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(1): 8-14.
- [7] Zhang J J, Zhou F, Sun G C, *et al.* Approach for ground fast-moving target Detection and imaging based on the three-channel forward-looking radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(1): 8-14.
- [8] Zhu S, Liao G, and Tao H. Ground moving targets detection and relocation in heterogeneous environment for airborne radar based on tri-channel real data[C]. *IEEE CIE International Conference on Radar*, Chengdu, 2011: 719-722.
- [9] Delphine C M. A generalization of DPCA processing for Multichannel SAR/GMTI Radars[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(1): 560-572.
- [10] Lü G, Wang J, and Liu X. Ground moving target indication in SAR images by symmetric defocusing[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(2): 241-245.
- [11] Sun G, Xing M, Xia X, *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] 李真芳, 保铮, 王彤. 分布式小卫星SAR系统地面运动目标检测方法[J]. *电子学报*, 2005, 33(9): 1664-1666.
- [13] Li Z F, Bao Z, and Wang T. Ground moving target indication for distributed small satellite SAR systems[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(9): 1664-1666.
- [14] 李真芳. 分布式小卫星SAR-InSAR-GMTI的处理方法[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2006.
- [15] Li Z F. Approaches to SAR-InSAR-GMTI for distributed small satellite SAR systems[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2006.
- [16] Li F and Johnson W T K. Ambiguities in spaceborne synthetic aperture radar data[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1983, 19(3): 389-397.
- [17] 何友, 关键, 彭应宁, 等. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 32-51.
- [18] He Y, Guan J, Peng Y N, *et al.* Radar Automatic Detection and Constant False Alarm Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999: 32-51.

- 吴明宇: 男, 1976年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理、SAR成像及地面运动目标检测。
- 杨桃丽: 女, 1987年生, 博士生, 研究方向为干涉合成孔径雷达成像。
- 吴顺君: 男, 1942年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为自适应信号处理、高速数字信号处理、电子系统建模与仿真。
- 李真芳: 男, 1977年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为干涉合成孔径雷达成像及地面运动目标检测。