

# 一种适用于双通道星载 SAR 的动目标检测技术

张绪锦<sup>1,2</sup>, 朱兆达<sup>1</sup>, 邓海涛<sup>2</sup>, 张长耀<sup>2</sup>, 陈仁元<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏南京 210016; 2. 华东电子工程研究所, 安徽合肥 230031)

**摘 要:** 实用的星载 SAR/GMTI 系统仍处于研制阶段, 从工程实现的角度研制一发双收的星载 SAR/GMTI 处理系统是可行的, 仿真结果表明这种体制能够有效抑制地杂波, 增强信杂比, 从而检测出被地杂波淹没的慢动目标信号, 并进行动目标参数估计. 运用论文给出的原理和检测方法对机载 SAR/GMTI 战场侦察雷达试验系统录取的动目标数据进行了实际验证, 获得了多帧连续可靠的真实动目标轨迹.

**关键词:** 星载 SAR/GMTI; 地面动目标轨迹; 杂波抑制; 恒虚警检测

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 09-1794-05

## A Moving Target Detection Method for Dual Aperture Spaceborne SAR

ZHANG Xu jin<sup>1,2</sup>, ZHU Zhao-da<sup>1</sup>, DENG Hai tao<sup>2</sup>, ZHANG Chang-yao<sup>2</sup>, CHEN Ren yuan<sup>2</sup>

(1. Department of Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

2. East China Research Institute of Electronic Engineering, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract:** Developing spaceborne SAR-GMTI system is concern by many countries, in view of engineering realize, we presented a spaceborne SAR-GMTI processing system model which use one aperture for transmitter and two receiver, computer simulation results show that the system can suppress clutter effective and enhance signal to clutter ratios (SCRs) sharply, so the radar system can easily estimating parameters and detecting ground slowly moving targets even they were embed in clutter. Follow the paper's method, after processing a part of the actual measured data recorded from an airborne battlefield reconnaissance radar designed by ECRREE, which take the first airborne SAR-GMTI tested in China, we get a continuous true track of ground slowly moving targets.

**Key words:** spaceborne SAR-GMTI; true imaging track of ground slowly moving targets; clutter suppression; CFAR process

## 1 引言

随着星载 SAR 图像产品的广泛应用, 人们要求星载 SAR 系统具有更强大的功能, 为满足这些需求, 星载 SAR 向着多极化、多模式、多波段方向发展. 在军事应用中, 除了用星载雷达对地面固定场景进行微波成像外, 一个十分重要的功能是需要具有对地面运动目标的检测、定位和聚焦能力, 也就是希望在 SAR 图像中把固定场景对消掉只保留运动目标轨迹或将检测出的运动目标迭加到图像上.

国际上机载 SAR/GMTI 已经付诸实现, 但星载 GMTI 仍处于研制阶段, 尚无实用系统, 这主要因为星载条件下杂波谱更宽、杂波强度更强、地面目标与卫星的速度相差更大且存在地球自转等因素, 因此检测难度也更大. 星载 GMTI 成为了近年来的研究热点, 如美国和加拿大都在研究包含同时 SAR/GMTI 模式的星载雷达, 分别称为 Techsat-21<sup>[1]</sup> 和 Radarsat-II<sup>[2]</sup>. 从已有的卫星

SAR 所做的试验来看, 采用单通道的接收体制, 低速目标检测能力弱, 方位定位精度差, 最大误差可达 1/2 个波束宽度所覆盖的距离, 实现 GMTI 有较大难度. 因此为了改善动目标的检测性能, 应该采用多通道接收的方法, 在 SAR 雷达沿飞行方向安装多个接收天线, 使之能从地面固定目标的回波中引入了空间和时间的相关性, 提高杂波抑制的效果, 改善动目标的检测能力, 从原理上讲接收通道越多, 系统自由度越大, 动目标检测能力越好, 但系统工程设计的复杂性和计算量等也将随之增大, 必须进行折衷考虑, 因此从工程实现的难易角度来看以两个接收通道为宜.

## 2 双通道接收星载 SAR/GMTI 回波模型

星载 SAR/GMTI 的回波在考虑地球自转时, 对地面固定目标其每秒位移约 556m, 其回波模型等效于大斜视, 以本文仿真计算用的 X 波段 (0.03m) 为例, 多普勒频率可达 37kHz 以上, 因此星载 SAR 一般均加偏航控

制,在加了偏航控制后,若按  $0.03^\circ$  的误差考虑,多普勒质心频率仅 18Hz 左右,基本上等效于正侧视;当用飞机作为平台时,由于载机偏流的影响,也不可能完全做到正侧视,一般来说  $1^\circ$  的斜视角是常见的,其多普勒质心频率也不为 0,星载 SAR 在仿真时需要考虑到地面杂波普宽、距离模糊、地球自转、地球曲率、电波传播等诸多因素的影响。双通道接收星载 SAR/GMTI 的等效观察模型如图 1 所示,其中 T 为等效发射的中心,  $R_1$ 、 $R_2$  分别为两个接收孔径,  $v_a$  为卫星飞行速度,  $h$  为卫星到地面的高度,  $P$  为波束覆盖区内的任一目标,其位置为  $(x, y, 0)$ ,速度为  $(v_x, v_y, 0)$ 。由几何关系,可以计算出在  $t$  时刻动目标到发射通道和两个接收通道的距离分别为:

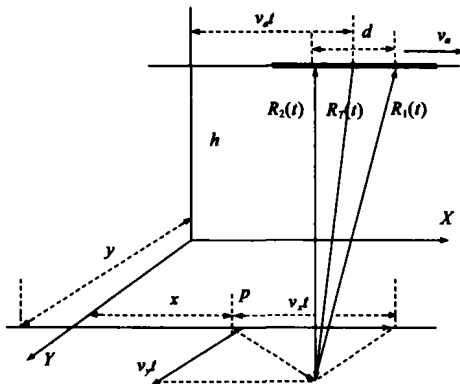


图 1 双通道接收星载 SAR 几何关系

$$R_T(t) = \sqrt{(h^2 + (v_a t - v_x t)^2 - (y + v_y t)^2)} \quad (1)$$

$$R_1(t) = \sqrt{(h^2 + (v_a t - v_x t + \frac{d}{2})^2 + (y + v_y t)^2)} \quad (2)$$

$$R_2(t) = \sqrt{(h^2 + (v_a t - v_x t - \frac{d}{2})^2 + (y + v_y t)^2)} \quad (3)$$

设合成孔径雷达发射的信号为:

$$s_t(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} p(t - nT) \quad (4)$$

其中:

$$p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{t_p}\right) \exp\left[j2\pi f_0 t + \frac{1}{2} k t^2\right] \quad (5)$$

式中:  $k$  为线性调频率,  $f_0$  为发射信号载频,  $t_p$  为脉冲宽度,则在  $t$  时刻,雷达的两个接收通道所接收到的照射区内某一点目标的回波信号经去载频后分别为:

$$\begin{aligned} s_{r1}(t, \tau) &= \sigma_i \text{rect}\left[\tau - \frac{R_1(t) + R_T(t)}{c}\right] \\ &\quad \cdot \exp\left[-j2\pi f_c \frac{R_1(t) + R_T(t)}{c}\right] \\ &\quad \cdot \exp\left[j\pi K_r \left(\tau - \frac{R_1(t) + R_T(t)}{c}\right)^2\right] \\ s_{r2}(t, \tau) &= \sigma_i \text{rect}\left[\tau - \frac{R_2(t) + R_T(t)}{c}\right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &\cdot \exp\left[-j2\pi f_c \frac{R_2(t) + R_T(t)}{c}\right] \\ &\cdot \exp\left[j\pi K_r \left(\tau - \frac{R_2(t) + R_T(t)}{c}\right)^2\right] \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $R_T(t)$  为  $t$  时刻该点目标到发射通道的距离;

$R_1(t)$ 、 $R_2(t)$  分别为  $t$  时刻该点目标到第 1、2 接收通道的距离;  $\sigma_i$  为地面目标的反射特性;  $c$  为光速;  $\tau$  为方位时间。将两天线接收到的回波信号处理得到两幅频域图像,这方面的详细推导过程可参考文献<sup>[4]</sup>。

由上面分析,可以把 SAR 回波数据看成地面散射系数  $\sigma_i$  这样一个二维信号通过一个冲击响应函数为  $h$  的系统输出,即  $s_r = \sigma_i * h$ ,将该式作二维频率变换,得到:  $S_r = W \cdot H$ 。式中:  $S_r$ 、 $W$ 、 $H$  分别是  $s_r$ 、 $\sigma_i$ 、 $h$  的二维谱。因此,在给定参数下得到星载 SAR 系统的传递函数  $H$ ,同时从实际图像数据和定标方程出发得到地面散射系数的二维谱,然后对  $S_r$  作二维逆变换就可得到原始回波数据了。在一个合成孔径过程中,需考虑距离徙动的问题,即当雷达与目标之间的距离超过一个距离分辨单元时,使来自同一目标的回波信号在距离向分布于不同的距离单元内。

### 3 地面动目标检测

#### 3.1 图像域 DPCA 检测原理

DPCA 技术是用来锐化杂波谱宽度以扩大多普勒清洁区的动目标检测能力,为了补偿平台运动位移的影响,应满足  $d = 2m\lambda T_r$ , 式中  $m$  为不等于零的整数,  $\lambda$  是雷达平台速度,  $T_r$  是脉冲重复周期,  $d$  为天线相位中心间隔距离,对于实际情况,该约束条件很难满足,因此我们选取了图像域的 ADPCA 处理技术,其基本思想是经距离脉压后,先两两通道分别形成和差波束,再分别自适应计算权矢量后,进行通道间杂波抑制,用差波束来补偿雷达运动引起的杂波谱展宽,处理流程见图

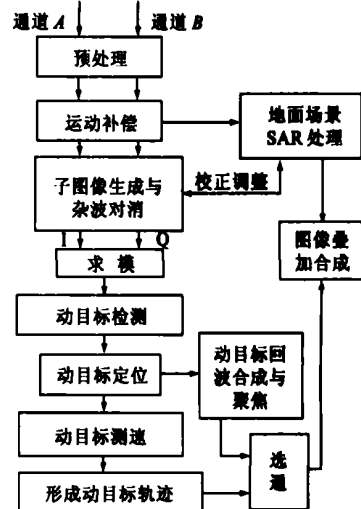


图 2 双通道动目标检测原理图

2. 图中通道校正及均衡, 主要是消去每个通道的直流电平及校正通道间的幅相不平衡, 保证  $I$  分量和  $Q$  分量的正交, 平衡  $I$ - $Q$  增益。校正部分用于测量雷达发射至接收的往返路径长度的变化, 以进行包络偏移及相位偏移的校正。由于卫星运行轨道的规律周期性, 星载平台其稳定度较高, 相比机载而言所受的影响要小, 故其校正参数可来自星历表和 GPS 等仪器。

子孔径图像的生成方法是采用将一个合成孔径长度在时间上分成多段, 这样每一段的时间称为子孔径时间, 为降低处理的复杂性, 常采用均匀非重叠来划分子孔径, 需要指出的是子孔径时间的选择和地杂波对消能力、距离分辨率、动目标的速度范围有关, 子孔径时间长, 对地杂波的抑制能力强; 若动目标在子孔径时间内, 移出了一个距离单元, 动目标的检测能力将下降; 若距离分辨率越高, 动目标的距离变化则越易超过一个距离单元, 因而子孔径时间的选择需要在上述几方面根据具体情况做综合取舍。

### 3.2 杂波对消及动目标检测

在双通道星载 SAR 系统中, 两个接收通道分别形成的图像是同一地域的图像, 但由于两个子孔径间的多普勒中心频率的偏差造成的线性相位为  $2\pi v_a d \cdot n T_r / R_0$ , 故在形成子图像前必须加以补偿。其中,  $v_a$  为星载平台的速度;  $d$  为两天线的间距;  $R_0$  为雷达至地面固定场景点在  $t = 0$  时的距离;  $n$  为脉冲数的编号;  $T_r$  为雷达发射脉冲重复周期。

形成子图像后, 由于两个接收天线在方位位置存在偏差, 必须补偿由位置偏差引起的相位误差, 方位上常采用频谱法, 其频域补偿函数为  $\exp[-j\pi(d^2 + R_0 \cdot df/v_a)/2R_0]$ 。在图像域内, 信号杂波比为  $S_I/C_I = T_{RCS}/\sigma_{gc}\rho_a\rho_r$ , 其中  $T_{RCS}$  为目标的雷达散射面积;  $\sigma_{gc}$  为地面杂波的归一化散射系数;  $\rho_a$ 、 $\rho_r$  分别为方位向、距离向分辨率, 然后再进行相减, 得到杂波对消后的图像为:

$$\Delta I = |I_1 - I_2| \propto \sin^2 \left[ \frac{\pi v_r d}{\lambda a} \right] \quad (8)$$

在式(8)当  $d = 2v_a T_r$  时,

$$\Delta I \propto \sin^2 \left[ \frac{2\pi v_r T_r}{\lambda} \right] \quad (9)$$

式中  $v_r$  是地面动目标的径向速度。

在对消后的图像  $\Delta I$  中, 虽然信杂比得到了较大的改善, 但往往有杂波剩余, 为了可靠的检测到动目标, 还需要采取以下三个步骤:

(1) 根据场景分布统计出杂波对消比的某一判决门限值来确定对消后的信号是杂波还是动目标;

(2) 在杂波剩余背景空间较均匀时, 采用 CFAR 技术作进一步检测;

(3) 在子图像对消后, 有动目标、杂波和噪声三种成份, 经 CFAR 检测后仍有杂波残余, 所以必须将子图像间进行距离、方位、速度三维的相关, 把相关不上的残余删除, 以降低杂波剩余, 减小虚警图像点, 降低对动目标后续处理的计算量。

由于运动目标存在径向速度, 被检测到的存在动目标的那个方位位置不代表其真实方位位置, 求出两子图像的干涉相位  $\Delta \varphi_{12}$ , 就可求出动目标的方位位置, 而距离位置由距离波门号可精确地确定。由干涉相位可计算出动目标的径向速度为:

$$v_r = \frac{\Delta \varphi_{12} v_a \lambda}{4\pi d} \quad (10)$$

其对应的地面动目标的径向速度  $v_{gr}$  为:

$$v_{gr} = \frac{v_r}{\sin \beta} \quad (11)$$

在星载 SAR 中, 动目标谱常和杂波谱重合, 当两个通道子图像的信杂比较小时, 动目标干涉相位的计算精度受到限制, 影响方位定位精度, 要进一步提高其精度, 需采用三个以上通道, 在杂波抑制后两个通道的信杂比已提高的情况下, 干涉相位的计算精度将进一步提高, 从而改善方位向定位精度。

## 4 计算机仿真及实测数据验证

### 4.1 仿真参数

仿真参数的配置为: 脉冲宽度 20μs, 发射带宽 80MHz, 采样率 100MHz, 脉冲重复频率 5000Hz, 卫星飞行速度 7500m/s, 工作波长 0.03m, 天线波束宽度 0.55°, 双天线接收孔径间隔  $d = 3$ m, 轨道高度 630km, 入射角 20°。

### 4.2 地面固定场景仿真

地面固定场景的模拟是采用一幅大小为  $600 \times 600$  的机载 SAR 图像, 其方位幅度谱的谱宽约为 500Hz, 根据前面所述的方法进行原始数据的模拟, 先得到原始数据的幅度灰度图, 然后对模拟的星载 SAR 原始回波数据应用常规的距离—多普勒算法进行成像处理, 得到图 3 的结果。从图中成像结果可以看出, 机载 SAR 图

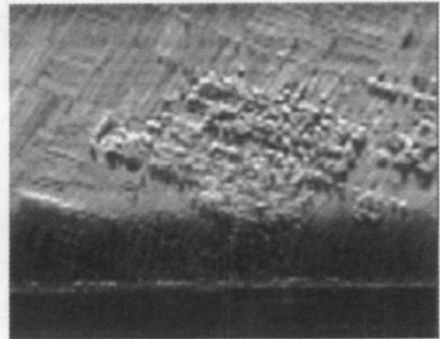


图 3 对模拟地杂波数据成像的结果

像和星载 SAR 图像所反映的地面杂波反射特性是相似的,因此该回波模拟方法是可行的.

4.3 动目标信号仿真

雷达回波是地面所有目标反射的叠加,在模拟好的杂波数据中叠加动目标回波信号,即可得到仿真所需的原始回波数据.在该仿真中,只模拟了动目标检测所需要的一个子孔径的数据即 512 个脉冲.对两个通道的子孔径数据划分为 16 个 CPI 后分别进行成像处理,其中第二个通道所得子图像的一部分如图 4,该图含 2 个 CPI 共 64 个脉冲.图 5 为对消前第二通道动目标所在单元距离向幅度增益图,可看出对消前动目标与地杂波的信杂比约为 6dB.

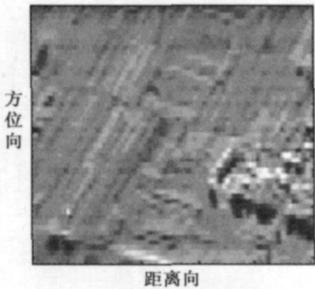


图 4 对消前第二通道子图像

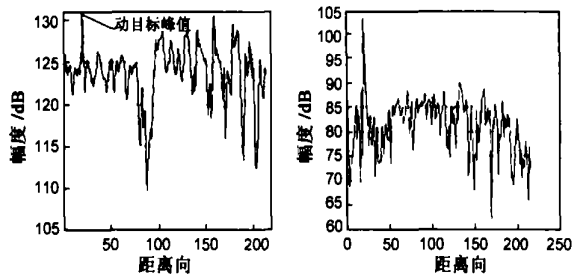


图 5 对消前动目标所在单元增益

图 6 对消后动目标的增益

以下是动目标在垂直于飞行航迹的不同速度下所对应的地杂波对消的试验结果,在此仅给出径向速度  $v_r=3\text{m/s}$  的情形,其余的结果见表 1.

表 1 不同径向速度下两通道子图像对消结果		
$V_r$ (m/s)	动目标所在单元峰值点幅度 (dB)	动目标与地杂波信噪比 (dB)
3	103.33	16
6	108.67	21
9	113.28	26
12	116.15	29
15	118.52	31.5
24	120.95	34
30	124.16	37

- 从上表可以看到:
- (1) 在二分之一盲速范围内,目标速度越快,地杂波对消后,动目标信噪比越大,越有利于动目标的后续检测处理.
  - (2) 动目标速度越慢,地杂波对消后,动目标信噪比越小,越不利于动目标的后续检测处理.
  - (3) 双通道动目标检测系统具有较好的地杂波抑制能力,能有效的检测低速运动目标.

4.4 对机载实测数据的验证

为检验仿真的效果,运用前面各节所述的原理和方法,对由电子 38 所机载 SAR/ GMTI 战场侦察雷达实验系统录取的一批双通道动目标数据进行了处理.该雷达系统采取波束扫描方式,天线沿飞行方向分为前后两部分,发射时采用全孔径,而接收则分为前后两个子孔径接收,并有两路接收通道输出,雷达系统参数如表 2 所示.

表 2 雷达参数配置

脉冲宽度	20 $\mu$ s
发射带宽	5MHz
脉冲重复频率	700Hz
工作波段	x
两天线间距	0.787m
平台飞行速度	110m/s
俯视角	4 $^{\circ}$
方位波束宽度	1.5 $^{\circ}$

地面配合的动目标为一辆卡车,试验中卡车在机场的跑道上以不同的速度行驶,下面给出行驶速度为 10km/h,飞机飞行方向和汽车行驶方向垂直时的检测结果,此时从理论分析来看,目标谱和杂波谱已重合,但对动目标运动轨迹的检测结果如图 7,图中每 32 个波位为一帧,帧间时间间隔约为 46ms,由图中可见,连续 13 帧均发现了目标,形成了行驶车辆的轨迹.检测采用 ADPCA+ 多普勒滤波+ 线性 CFAR 处理,其检测的第一门限均值为 10.8dB,进行分频检测后再合成,得到多帧连续的地面动目标轨迹.在星载 GMTI 中,很重要的一点是杂波谱和目标谱在大部分多普勒范围内是重迭的,所以将该方法用于星载 SAR/ GMTI 是可行的.

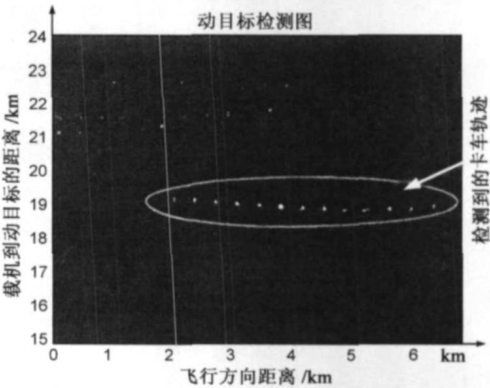


图 7 地面动目标的运动轨迹

5 结论

通过对实现双通道星载 SAR/ GMTI 技术的理论分析、计算机模拟以及用实际机载数据对地杂波对消、动目标检测、定位和测速处理表明,在双通道星载 SAR 中采用 ADPCA 处理能够有效地抑制地杂波,增强信杂比,

从而能有效的检测出被地杂波淹没的低速动目标信号,进行聚焦成像处理.

#### 参考文献:

- [1] Martin M, Stallard M J. Distributed satellite missions and technologies the techSat 21 program[A]. AIAA Space Technology Conference and Exposition [C]. USA: AIAA 99 - 4479, September 1999.
- [2] Livingstone C E, Sikaneta I, Gierull C H, et al. An airborne synthetic aperture radar experiment to support RADARSAT 2 ground moving target indication[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2002, 28( 6): 794- 813.

#### 作者简介:



张绪锦 男, 1966 年生于贵州锦屏, 高级工程师, 现为南京航空航天大学博士研究生. 主要从事系统信息获取处理和 SAR/ MTI 研究.

E-mail: michaelzhang2968@sina.com

邓海涛 男, 1978 年出生于湖北京山, 工程师, 主要从事高分辨 SAR 成像和动目标检测处理工作.

- [3] R Keith Raney. Synthetic aperture imaging radar and moving targets[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1971, 7( 3): 499- 505.
- [4] 李景文. 合成孔径雷达动目标检测与成像[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1999.  
LI Jing wen. Synthetic aperture radar moving target detecting and imaging[D]. Beijing: BUAA, 1999. (in Chinese)
- [5] 孙娜, 周荫清, 李景文. 一种新的双孔径天线干涉 SAR 动目标检测方法[J]. 电子学报, 2003, 31( 12): 1820- 1823.  
SUN Na, ZHOU Yin qing, LI Jing wen. A new moving target detection method based on dual aperture antenna interferometric SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31( 12): 1820- 1823. (in Chinese)



朱兆达 男, 1939 年生, 教授, 1960 年毕业于南京航空学院, 现为南京航空航天大学博士生导师, 中国电子学会会士, IEEE 高级会员, 研究方向: 雷达信号检测与处理.

张长耀 男, 1942 年生, 研究员, 获国家级、省部级科技进步奖 10 多项, 主要从事雷达系统信号处理和 SAR/ MTI 研究.

陈仁元 男, 1970 年生, 高级工程师, 主要从事 SAR 成像算法和动目标检测处理工作.