

# 一种视频 SAR 运动目标成像算法

闫蒙恩, 李凉海, 陈浩川, 张振华  
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 视频合成孔径雷达 ViSAR (Video Synthetic Aperture Radar) 成像模式与传统 SAR 成像模式不同, 此模式需要持续监测目标区域。通过子孔径划分的方法将目标区域的回波划分孔径, 然后针对每一个划分后的子孔径进行单独成像和配准, 最后把每一帧图像进行处理形成视频, 利用序列图像形成的视频去提取目标的运动信息。视频 SAR 独特的高帧率成像处理使其对运动目标的检测具有很大的优势。提供了一种基于极坐标算法 PFA (Polar Format Algorithm) 的视频 SAR 运动目标成像的方法, 视频 SAR 成像帧率可达到每秒 5 帧。

**关键词:** 视频 SAR; 子孔径划分; PFA; 运动目标成像

中图分类号: TN911.72 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)01-0051-05

## Motion target imaging algorithm of ViSAR

YAN Meng'en, LI Lianghai, CHEN Haochuan, ZHANG Zhenhua  
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The imaging mode of video synthetic aperture radar (ViSAR) is different from SAR imaging mode, which requires continuous monitoring of target area. The echo of target area is divided into sub-aperture and each partition is imaged and registered separately. Finally, the images of each frame are processed to form a video and the motion information of the target can be extracted from the sequence images. The unique high frame rate imaging processing of ViSAR makes it more suitable for detecting moving targets. This paper provides a moving target detection algorithm based on polar format algorithm (PFA) for ViSAR. The frame rate of ViSAR imaging can reach 5 frames per second.

**Key words:** Video SAR; Sub-aperture division; PFA; Motion target imaging

## 引 言

合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 以其全天时、全天候、对云层穿透性强、具有较高分辨率等优点, 广泛应用于军事和民用领域<sup>[1]</sup>。近年来, 为了解决传统 SAR 无法提供视频探测模式以及对运动目标检测与跟踪性能较差的问题, 研究人员提出了视频合成孔径雷达的概念, 视频 SAR 以其能够对相位历程域持续采集和处理, 对地面运动目标显示、相干变化检测和具有三维成像的鲁棒性等优点备受关注<sup>[2]</sup>。短短数年间, SAR 技术飞速发展, 美国国防高级研究计划局 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) 已研发出能够满足对运动目标实时成像与跟踪需求的机载有源感知系统<sup>[3,4]</sup>。

视频 SAR 为了能够得到更高分辨率的视频图像, 需要对感兴趣的一块区域持续照射, 因此, 视频 SAR 工作模式一般为条带、聚束和圆周成像模式, 聚束模式是最常见的一种工作模式。视频 SAR 中载机平台一般绕着目标区域圆周飞行或者直线飞行。本文主要针对聚束模式下的视频 SAR 进行研究。视频 SAR 通常采用比较成熟的 SAR 成像算法, 本文采用的算法是聚束模式下的算法极坐标算法 PFA。不同于传统聚束模式下的 PFA, 视频 SAR 需要首先对接收到的回波进行孔径分割, 然后对孔径分割后的数据分别使用算法成像, 最后把每一帧图采用相干处理方法进行融合以视频的形式再现目标区域的场景信息<sup>[5]</sup>。

## 1 聚束模式视频 SAR

如图 1 所示, 视频 SAR 工作在聚束模式下, 能够对目标区域持续成像, 并且将整个合成孔径划分为子孔径分别成像。

### 1.1 数据分割

对接收到的回波数据进行孔径分割, 主要分为两种情况, 数据重叠与数据不重叠, 数据不重叠的情况也可以视为数据重叠率为 0<sup>[6]</sup>。

如图 2 所示, 通过划分孔径来实现视频 SAR 高帧率视频模式成像, 通过对划分孔径后的分辨率和帧率探究, 得出一种实现高帧率成像的优化 PFA 算法。

#### 1.1.1 分辨率

##### ① 距离向分辨率

$$\rho = \frac{0.886c}{2B_r \sin \eta} \quad (1)$$

式中,  $B_r$  为雷达信号带宽,  $c$  为光速,  $\eta$  为雷达波束入射角。

##### ② 方位向分辨率

$$B_a = f_d(n) - f_d(n-1) = \frac{2V_0}{\lambda} (\sin \theta_n - \sin \theta_{n-1}) \quad (2)$$

式中,  $f_d(n)$  为子孔径  $n$  的多普勒中心频率,  $\lambda$  为波长,  $V_0$  为载机飞行速度,  $\theta_{n-1}$  为子孔径  $n$  起始角度,  $\theta_n$  为子孔径  $n$  终止角度。

由于多普勒带宽可以表示为

$$B_a = \frac{V_0}{\rho_a} \quad (3)$$

联立式 (2)、式 (3) 可以得到方位向分辨率为

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2(\sin \theta_n - \sin \theta_{n-1})} \quad (4)$$

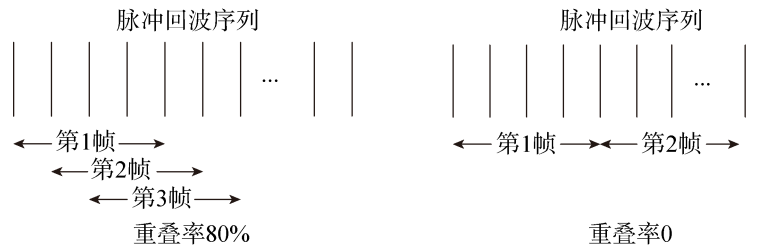


图 2 不同重叠率下的划分示意图

Fig. 2 Diagram of division under different overlap rates

#### 1.1.2 帧率

与传统 SAR 成像不同, 视频 SAR 最显著的特点就是能够将成像结果以视频模式呈现, 因此, 帧率同样是视频 SAR 中一个重要的参数。设相邻两孔径之间的重叠率为  $\alpha$ , 则对于子孔径片段  $n$ , 其合成孔径长度可以表示为

$$L_i = r_i (\sin \theta_n - \sin \theta_{n-1}) \quad (5)$$

式中,  $r_i$  为雷达相位中心到目标距离。

子孔径片段持续时间  $t_i$  可以表示为

$$t_i = \frac{L}{V_0} \approx \frac{r_i \lambda}{2V_0 \rho_a} (1 - \alpha) \quad (6)$$

由 (6) 可以得出, 帧率为

$$f_z = \frac{1}{t_i} = \frac{r_i \lambda}{2V_0 \rho_a} (1 - \alpha) = \frac{2V_0 \rho_a}{r_i \lambda (1 - \alpha)} \quad (7)$$

其中,  $\lambda = c / f$ 。

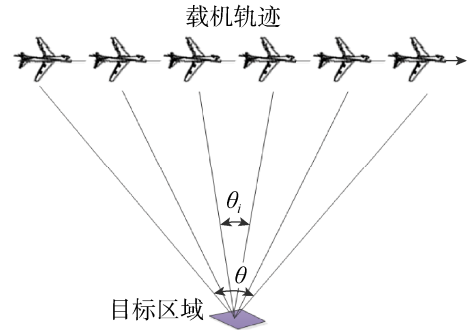


图 1 聚束模式视频 SAR

Fig. 1 Bunching mode video SAR

由式(7)可知,可以通过改变信号发射频率和相邻子孔径间重叠率来调整视频 SAR 帧率。通过提高信号发射频率能够有效提高帧率,当帧率提高至 5Hz/s,需要将频率提高至 THz 以上,这很难实现,因此,主要通过控制调节重叠率来使帧率满足需求。

## 2 运动目标成像算法分析

视频 SAR 主要对运动目标进行处理,本节主要基于视频 SAR 分辨率与帧率对运动目标特性进行分析研究。图 3 所示为正侧视聚束模式成像几何模型,场景中心为图中  $O$  点,运动目标  $A$  起始位置坐标为  $(x, y, 0)$ ,天线相位中心为图中  $B(x_b, y_b, z_b)$  点。假设目标以速度  $v_x$  沿  $x$  方向匀速直线运动,则目标的位置坐标为  $(x+v_x t, y, 0)$ 。

其中,  $r_t$  为雷达相位中心  $B$  到目标  $A$  的距离,  $r_c$  为雷达相位中心  $B$  到场景中心  $O$  的距离。

雷达发射宽带线性调频信号(LFM)为

$$S(\tau) = \text{rect}\left(\frac{\tau}{T_r}\right) \times \exp(j\pi k \tau^2) \times \exp(j2\pi f_c \tau) \quad (8)$$

式中,  $\tau$  为快时间变量,  $T_r$  为脉宽,  $k$  为信号调频率,  $f_c$  为发射信号载频,信号带宽  $B_r = kT_r$ 。

经过  $2r_t/c$  的延时接收到回波信号,通过解调后可以表示为

$$S(t, \tau) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \times \text{rect}\left(\frac{\tau - 2r_t/c}{T_r}\right) \times \exp(j\pi k (\tau - 2r_t/c)^2) \times \exp(-j\frac{4\pi f_c}{c} r_t) \quad (9)$$

式中,  $c$  为光速,  $t$  为方位慢时间,  $T_a$  为方位孔径时间。利用驻留相位原理,对式(9)做距离向 Fourier 变换得到  $S(t, f_\tau)$ ,

并对回波数据进行匹配滤波和运动补偿,使场景中心点回波相位为零,对式(9)乘以参考函数  $S_0(t, f_\tau)$ ,可以得到 PFA 处理前的信号为

$$S_B(t, f_\tau) = S(t, f_\tau) \times S_0(t, f_\tau) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \times \text{rect}\left(\frac{f_\tau}{kT_r}\right) \times \exp(j\frac{4\pi}{c} (f_c + f_\tau)(r_c - r_t)) \quad (10)$$

式中,  $S_0(t, f_\tau) = \exp(j\pi \frac{f_\tau^2}{k}) \times \exp[j\frac{4\pi}{c} (f_c + f_\tau)r_c]$ 。

由于雷达工作在聚束模式下,可以忽略波前弯曲的影响,因此,可以将雷达发出的波近似为平面波,差分距离  $r_c - r_t$  可以表示为

$$r_c - r_t \approx x \cos \varphi \sin \theta + y \cos \varphi \cos \theta \quad (11)$$

式中,  $\theta$  为方位角,  $\varphi$  为俯仰角。

代入式(10)中,忽略信号幅度影响,可以得到

$$S_B(t, f_\tau) = \exp\left\{j\left[x \frac{4\pi}{c} (f_c + f_\tau) \cos \varphi \sin \theta + y \frac{4\pi}{c} (f_c + f_\tau) \cos \varphi \cos \theta\right]\right\} \quad (12)$$

然后,将其变换到波数域进行插值处理,距离向插值处理为

$$f_\tau = f_c (\delta - 1) + \delta f'_\tau \quad (13)$$

式中,  $\delta = \cos \varphi_0 / (\cos \varphi \cos \theta)$  为距离频率尺度变换因子;  $f'_\tau$  为变换后的距离频率变量。方位向插值处理为进行 keystone 变换:

$$t = \frac{f_c}{f_c + f_\tau} t' \quad (14)$$

式中,  $t'$  为变换后的方位时间变量。随后对其进行二维 FT 成像处理,利用参考文献[7]中的一种运动补偿方法,本次仿真算法具体流程图如图 4 所示。

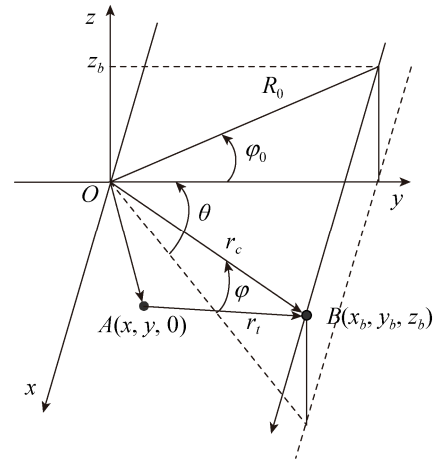


图 3 正侧视聚束 SAR 示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of forward lateral converging SAR

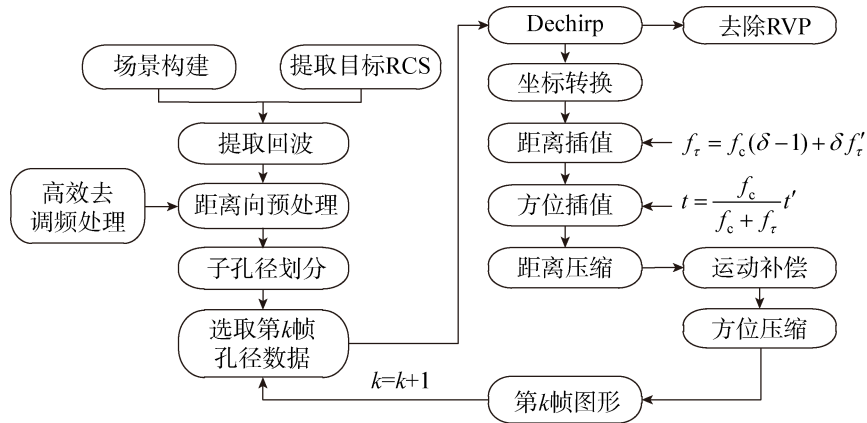


图 4 算法流程图

Fig. 4 Algorithm flow chart

### 3 仿真验证

本次仿真采用基准图如图 5 (a) 所示，实际区域为 256m×256m，目标采用两个 2m×5m 车辆做 10m/s 匀速直线运动，目标车辆雷达散射截面积 RCS (Radar Cross Section) 仿真图如图 5 (b) 所示。

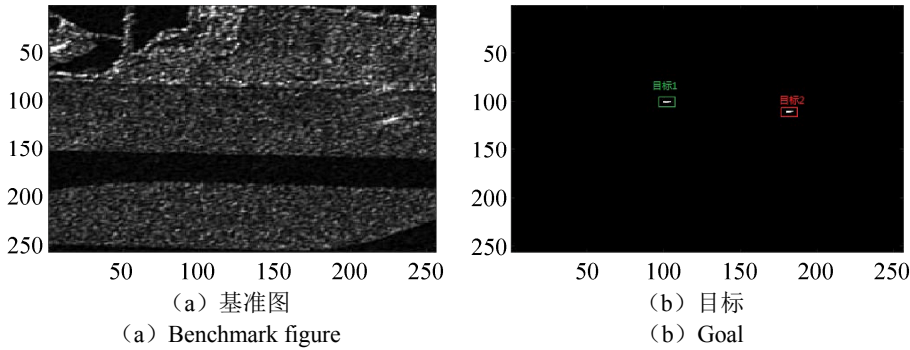


图 5 基准图与车辆 RCS

Fig. 5 Benchmark figure and Vehicle RCS

具体目标车辆 RCS 值在表 1 和表 2 中示出，数值按照从左到右及由上到下分别对应图 5 (b) 中目标 1 和目标 2。

表 1 目标 1 RCS

Table 1 Goal 1 RCS

219	228	187	255	255
198	232	227	172	75

表 2 目标 2 RCS

Table 2 Goal 2 RCS

194	248	225	255	193
222	255	220	119	8

使用以上算法对每一子孔径数据进行成像处理，经过 8s 形成 40 帧图形，图 6 分别选取 40 帧图中的第 1 帧、第 20 帧和第 40 帧图分析其位置，验证算法可行性。

如图 5 中 (b) 所示，绿色方框为目标 1，红色方框为目标 2。提取回波后采取子孔径划分进行成像处理，通过图 4 所示算法流程，帧率可达每秒 5 帧。选取成像结果中的第 1 帧、第 20 帧和第 40 帧图，如图 6 所示。

第 1 帧图中，目标 1 位置坐标为(170:171,200:204)，目标 2 位置坐标为 (180:181,180:184)；第 20 帧图中，目标 1 位置坐标为 (168:169,157:161)，目标 2 位置坐标为 (181:182,138:142)；第 40 帧图中，目标 1 位置坐标为 (169:170,117:121)，目标 2 位置坐标为 (179:180,98:102)。

忽略距离向微小波动，在方位向上目标 1 在 8s 内位置从 (200:204) 移动至 (117:121) 共移动了 83m，通过计算可得目标 1 平均速度为 10.375m/s，同理，计算得知目标 2 平均速度为 10.25m/s，与初始设定运动速度为 10m/s 基本一致，验证了算法的可行性。

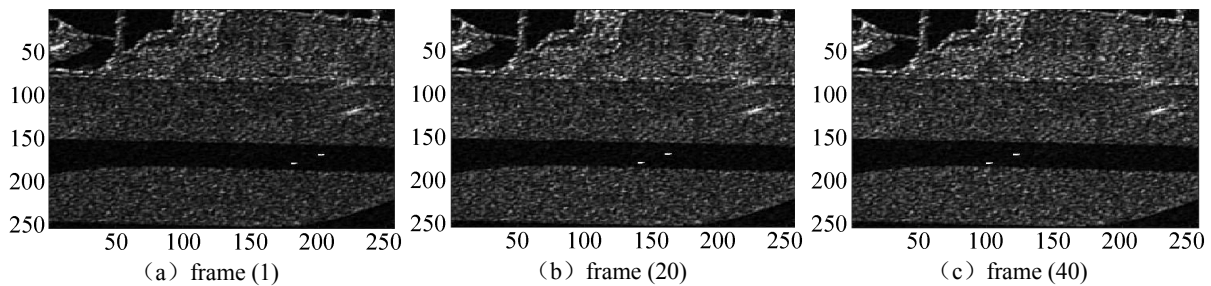


图 6 本次试验选取第 1 帧、第 20 帧和第 40 帧图  
Fig. 6 Frames 1,20 and 40 were selected for this experiment

#### 4 结束语

本文介绍了一种基于视频 SAR 的子孔径划分的 PFA 实现运动目标成像算法, 文章详细介绍了所用算法流程, 通过对工作在聚束模式下的视频 SAR 高分辨率和高帧率分析, 算法可以实现帧率为每秒 5 帧, 最后根据所成图像计算得出, 目标在图像中的位置计算出的速度与预设速度基本吻合, 验证了算法的可行性。

#### 参考文献

- [1] MOREIRA A, IRAOLA P P, YOUNIS M, et al. A tutorial on synthetic aperture radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2013, 1(1): 6–43.
- [2] ZHANG Ying, MAO Xinhua, YAN He, et al. A novel approach to moving targets shadow detection in VideoSAR imagery sequence[J]. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2017: 606–609.
- [3] WALLACE H B. Development of a video SAR for FMV through clouds[C]. The SPIE 9479, Open Architecture/Open Business Model Net-Centric Systems and Defense Transformation 2015: 94790L. doi:10.1117/12.2181420.
- [4] WALLACE H B. DARPA MMW System programs and how they drive technology needs[C]. DMRC Millimeter-Wave Technology Workshop, 2014.
- [5] 梁健, 张润宁, 包敏凤. 天基视频 SAR 系统设计及成像算法研究[J]. 中国空间科学技术, 2016, 36(6): 22–28.  
LIANG Jian, ZHANG Running, BAO Minfeng. Research on spaceborne video SAR system design and image formation algorithm[J]. Chinese Space Science and Technology, 2016, 36(6): 22–28.
- [6] 李皓月. 视频合成孔径雷达动目标成像方法[D]. 成都电子科技大学, 2018.
- [7] LINNEHAN R, MILLER J, ASADI A. Map-drift autofocus and scene stabilization for video-SAR[C]. IEEE Radar Conference (RadarConf), 2018: 1401–1405.
- [8] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 电子工业出版社, 2005.

#### [作者简介]

- 闫蒙恩 1995 年生, 在读硕士, 主要研究方向为视频 SAR 运动目标检测跟踪技术。  
李凉海 1965 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为雷达系统设计。  
陈浩川 1979 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为雷达总体设计。  
张振华 1977 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为雷达系统与信号处理。