

文章编号: 1671-0576(2023)01-0032-07

# 基于间歇模式的 SAR 成像仿真设计

刘亚奇<sup>1,2,3</sup>, 潘鹤斌<sup>4</sup>, 苏皎阳<sup>1,2,3</sup>, 张金强<sup>1,2,3</sup>, 付朝伟<sup>1,2,3</sup>

(1. 上海无线电设备研究所, 上海 201109; 2. 上海目标识别与环境感知工程技术研究中心, 上海 201109; 3. 中国航天科技集团有限公司交通感知雷达技术研发中心, 上海 201109; 4. 海军装备部驻上海地区第六军事代表室, 上海 201109)

**摘要:** 在综合考虑分辨率、噪声等效后向散射系数、成像延迟等方面要求的基础上, 设计间歇(Burst)模式合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)成像模式。提出了一种机动平台实时成像算法, 完成了适用于机动平台的雷达实时成像系统的设计仿真流程。经仿真实验验证, 所提算法对平台存储资源的需求低, 实时性好, 能够满足 Burst 模式 SAR 成像体制需求。

**关键词:** 合成孔径雷达; 间歇成像模式; 实时成像算法

**中图分类号:** TN959.3

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1671-0576.2023.01.006

## Simulation Design of SAR Imaging Based on Burst Mode

LIU Yaqi<sup>1,2,3</sup>, PAN Hebin<sup>4</sup>, SU Jiaoyang<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Jinqiang<sup>1,2,3</sup>, FU Chaowei<sup>1,2,3</sup>

(1. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Target Identification and Environment Perception, Shanghai 201109, China; 3. Traffic Perception Radar Technology Research & Development Center of CASC, Shanghai 201109, China; 4. The Sixth Military Representative Office in Shanghai of Shanghai Bureau of the Department of Naval Equipment, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** On the basis of the requirements of resolution, noise equivalent backscattering coefficient and imaging delay, the burst imaging mode of synthetic aperture radar (SAR) was designed. A real-time imaging algorithm for aircraft platform was proposed, and the integrated design and simulation process of radar imaging system for aircraft platform was completed. The simulation results show that the proposed algorithm has low requirements for platform storage resources and good real-time performance, and can meet the needs of burst mode SAR imaging system.

**Key words:** SAR; burst imaging mode; real-time imaging algorithm

## 0 引言

合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 是一种高分辨率的有源微波遥感成像雷达, 雷达图像中含有丰富的信息, 可用于目标多种特性的测量。SAR 自带照射源, 对天时、云雾和降水不敏感, 可以在黑暗、云雨条件下工作。某些波段的电磁波可以穿透叶簇甚至地表等遮挡物, 因此具有全天候、全天时、反伪装等光学成像系统所不具备的优点<sup>[1]</sup>。目前, SAR 已广泛应用于地球遥感、海洋研究、农业/林业资源勘探、环境监测、建筑/桥梁/车辆探测等民用领域, 在军事侦察、目标监测、精确制导等军事领域也具有广阔应用前景, 已成为当今高速发展的研究热点之一。

目前, SAR 已经从最初的单一视角雷达, 发展成为多功能、多频段、高分辨、多模式、多极化的雷达。为满足不同应用需求, 新的 SAR 成像模式被提出, 相应地对 SAR 所提供信息的质量和容量也提出了更高的要求。

单发单收体制 SAR 中扫描模式 SAR (ScanSAR) 仍然是实现宽测绘带最经典且高效的方法<sup>[2]</sup>。ScanSAR 通过周期性切换天线波束的视角, 得到由子测绘带拼接而成的宽测绘带的雷达图像, 满足了一次作业就能得到监测区域大面积、宽测绘带图像的需求<sup>[3]</sup>。这种工作模式实现了测绘带宽相对于条带模式几倍的扩展, 但同时也面临牺牲方位向分辨率的问题。

因此, 满足匹配导航需求的 SAR 成像体制设计是目前的重要研究领域, 未来还将发展更多的工作模式。对于先进的机动平台匹配导航应用系统, 必然以高性能的 SAR 成像算法为基础。虽然国内在该方面研究已经取得长足的进步和显著的成果, 但是成像性能还存在不足, 且现有 SAR 子孔径成像算法难以满足实际应用要求, SAR 成像算法还有待改善<sup>[4-6]</sup>。

本文在对国内外机动平台 SAR 成像研究成果充分认识和分析的基础上, 结合匹配导航的需求, 提出一种适用于机动平台的 SAR 实时成像体制。以匹配导航对 SAR 图像的需求为最基本的设计输入, 采用间歇 (Burst) 模式, 解决 SAR 成像大幅宽与实时性的矛盾。首先对 SAR 各指标逐

层进行分解, 讨论技术指标与系统参数之间的制约关系, 进而给出系统参数设计方法。在此基础上提出一种机动平台平飞段大斜视实时成像算法, 并给出适用于机动平台的雷达实时成像系统的设计仿真流程。

## 1 雷达实时成像体制设计

### 1.1 Burst 模式 SAR 指标体系

Burst 模式 SAR 各部分参数相互耦合、互相影响, 因此在讨论雷达实时成像设计流程之前, 有必要建立该雷达的指标体系。Burst 模式 SAR 指标体系主要包含牵引指标、雷达波形参数、天线参数、波位参数、飞行参数等部分。

SAR 设计的核心是建立其指标体系, 并对各相关参数关系深刻理解和把握。各相关参数相互耦合, 且上下级参数间具有制约关系。Burst 模式 SAR 指标体系如图 1 所示。利用该指标体系可以更清晰地说明基于 Burst 模式的 SAR 实时成像体制的设计思路及各参数间的相互关系。

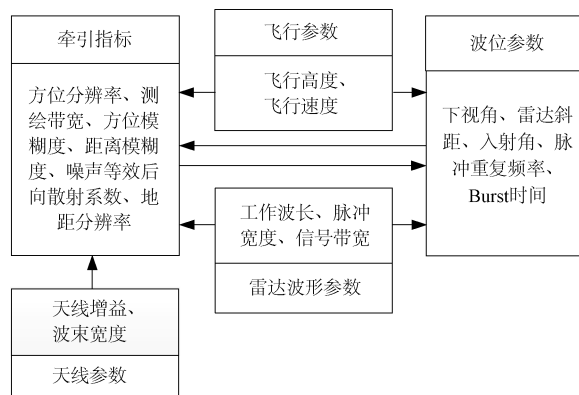


图 1 Burst 模式 SAR 指标体系

### 1.2 Burst 模式 SAR 成像原理

在设计 Burst 模式 SAR 时, 算法误差及计算效率是选择成像算法时的重要考虑因素。在实际应用中, 传统的 SAR 主要有两种工作方式: 一种是聚束模式, 一种是条带模式。聚束模式下方位分辨率可以很高, 但是距离测绘带宽度受限, 且方位测绘带也不连续。条带模式下测绘范围能够完全覆盖目标区域, 并保证相邻条带之间足够的重叠宽度。

目前 SAR 多采用平板天线, 不能进行波束扫

描, SAR 成像只能采用条带模式。由于条带模式数据量大, 拟采用 Burst 模式降低数据量、提高实时性。根据分辨率、测绘带宽、噪声等效后向散射系数、成像延迟等要求以及雷达相关参数, 设计了一种 Burst 模式 SAR 成像流程, 如图 2 所示。雷达开机工作一段时间后(小于合成孔径时间)转入待机状态, 待机期间进行信号处理, 然后再次开机, 如此循环多次。对雷达录取的多个 Burst 数据单独进行 SAR 成像处理, 最后对多个 Burst 图像进行拼接, 获取满足指标要求的 SAR 图像。

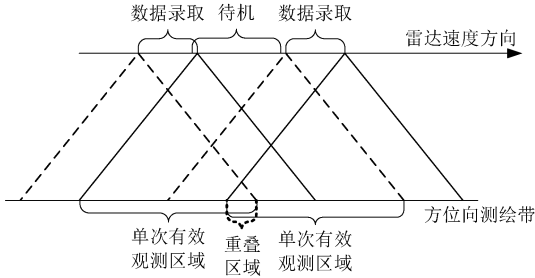


图 2 Burst 模式 SAR 成像流程示意图

### 1.3 Burst 模式 SAR 成像几何模型

建立匹配中心航向坐标系  $oxyz$ , 原点  $o$  为地面某一点,  $x$  轴水平指向预定航行方向,  $y$  轴沿地表法线方向, 指天为正,  $z$  轴由右手法则确定。Burst 模式 SAR 成像几何模型<sup>[7-8]</sup>如图 3 所示。

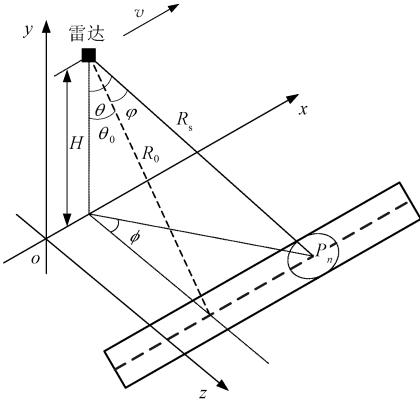


图 3 Burst 模式 SAR 成像几何模型

图 3 中,  $H$  表示飞行高度,  $v$  表示飞行速度,  $R_s$  表示雷达斜距,  $R_0$  表示雷达最近斜距,  $\theta$  表示雷达下视角,  $\theta_0$  表示零多普勒面下视角,  $\varphi$  表示雷达斜视角,  $\phi$  表示雷达方位角。设雷达工作于 Burst 模式, 点目标  $P_n(x_n, y_n, z_n)$  为 Burst 成像场景中心点, 即 Burst 时间中心时刻的波束中心指向该点。

## 2 Burst 模式 SAR 典型参数设计

### (1) 测绘带宽度

测绘带宽度

$$W = H(\tan \theta_f - \tan \theta_n) \quad (1)$$

式中:  $\theta_f$  为测绘带远端下视角;  $\theta_n$  为测绘带近端下视角。根据雷达距离向波束宽度, 测绘带宽度随雷达波束中心下视角的变化情况如图 4 所示。随着雷达波束中心下视角的增大, 测绘带宽度增大。但是, 雷达波束中心下视角的增大将导致斜距增大, 进而导致回波信号信噪比降低。测绘带宽度应综合考虑脉冲重复频率和信噪比后确定。

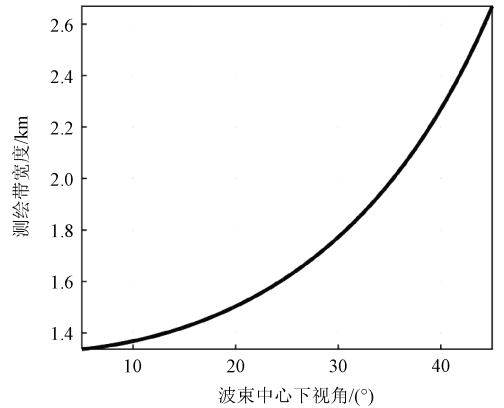


图 4 测绘带宽度随雷达波束中心下视角的变化

### (2) 脉冲重复频率及波位参数

脉冲重复频率应大于多普勒频率带宽, 同时需要考虑发射信号干扰、底视回波干扰、方位模糊度和距离模糊度的影响。

发射信号干扰对脉冲重复频率的限制应满足

$$\begin{cases} \text{Frac}(2R_n f_{pr}/c)/f_{pr} > \tau_p + \tau_{rp} \\ \text{Frac}(2R_f f_{pr}/c)/f_{pr} < 1/f_{pr} - \tau_p - \tau_{rp} \\ \text{Int}(2R_f f_{pr}/c) = \text{Int}(2R_n f_{pr}/c) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\text{Frac}(\cdot)$  为取小数函数;  $R_n$  为测绘带近端斜距;  $R_f$  为测绘带远端斜距;  $f_{pr}$  为脉冲重复频率;  $c$  为电磁波波速;  $\tau_p$  为发射脉冲宽度;  $\tau_{rp}$  为保护时间;  $\text{Int}(\cdot)$  为取整函数。

底视回波干扰对脉冲重复频率的限制应满足

$$\begin{cases} 2H/c + (Z_0 + 1)/f_{pr} > 2R_f/c \\ 2H/c + 2\tau_0 + Z_0/f_{pr} < 2R_n/c \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\tau_0$  为底视回波持续时间;  $Z_0$  为非负整数。

综合考虑发射信号干扰、底视回波干扰、方位

及距离模糊度和信噪比等影响因素,设计 4 个波位的波束中心下视角。根据波束中心下视角与脉冲重复频率的函数关系绘制斑马图,如图 5 所示。可以看出,其中 3 条纵向深灰色区域为避开发射信号干扰和底视回波干扰的有效脉冲重复频率和波束中心下视角区域,图中小方框对应 4 个波位的脉冲重复频率。

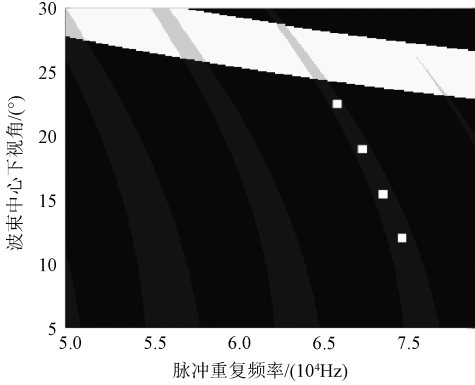


图 5 Burst 模式 SAR 斑马图

(3) 地距分辨率

地距分辨率  $\rho_{rg}$  主要与发射信号带宽  $B_r$  和雷达入射角  $\eta$  有关,其计算公式为

$$\rho_{rg} = \frac{c}{2B_r \sin \eta} W_r \quad (4)$$

式中:  $W_r$  为距离向加窗处理展宽系数。设计各波位发射信号带宽时,应使 4 个波位均满足分辨率要求,且不同波位的分辨率基本一致。

(4) 方位向分辨率

方位向分辨率

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2\theta_a} K_a \quad (5)$$

式中:  $\lambda$  为雷达工作波长;  $\theta_a$  为方位向波束宽度;  $K_a$  为方位向加窗处理展宽系数。对于 Burst 成像模式,  $\theta_a$  受到 Burst 时间的影响,因此方位向分辨率与 Burst 时间有关。雷达开机时间越短,方位向分辨率越低,数据量越小,但是信噪比越低。综合考虑上述因素,且要求 4 个波位的方位向分辨率相同,对方位向分辨率进行设计。4 个波位对应的方位向分辨率及 Burst 时间、Burst 方位向测绘长度、Burst 间隔时间等相关参数仿真结果如图 6 所示。其中, Burst 间隔时间为上一个 Burst 雷达待机时刻与下一个 Burst 雷达开机时刻之间的时间间隔。

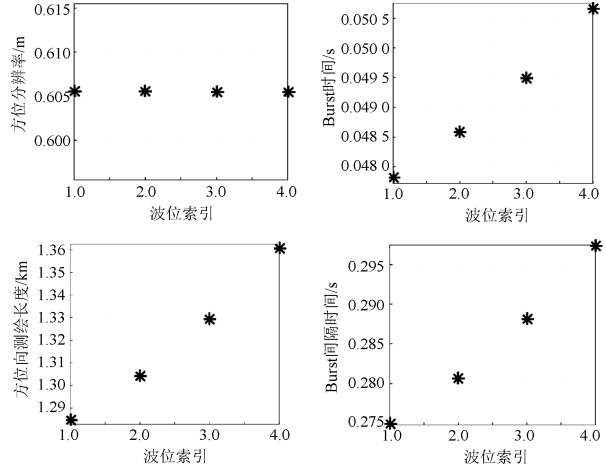


图 6 方位向分辨率及相关参数仿真结果

(5) 方位模糊度

方位模糊度

$$p_a = \frac{\sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \int_{B_{ps}}^{B_{pe}} G_a^2(f_D - f_{Dc} + mf_{pr}) df_D}{\int_{B_{ps}}^{B_{pe}} G_a^2(f_D - f_{Dc}) df_D} \quad (6)$$

式中:  $G_a(\cdot)$  为方位向天线方向图函数;  $f_D$  为多普勒频率;  $f_{Dc}$  为多普勒中心频率;  $m$  为模糊区编号,实际应用中一般取  $[-10, 10]$ ;  $B_{ps}$  和  $B_{pe}$  分别为方位向成像处理器的起始频率和截止频率。对于每一 Burst 时间,方位向中心和边缘处的目标分别被方位向天线以不同角度照射,导致方位模糊度不同。

(6) 距离模糊度

距离模糊度

$$p_r = \frac{\sum_i \sum_{m \neq 0} \frac{\sigma_0(\tau + m/f_{pr}) G_r^2(\tau + m/f_{pr})}{R_{i,m}^3 \sin(\eta_{i,m})}}{\sum_i \frac{\sigma_0(\tau) G_r^2(\tau)}{R_{i,0}^3 \sin(\eta_{i,0})}} \quad (7)$$

式中:  $\sigma_0(\cdot)$  为目标的后向散射系数函数;  $\tau$  为时间周期;  $G_r(\cdot)$  为距离向天线方向图函数;  $R_{i,m}$  表示第  $m$  模糊区的第  $i$  个下视角对应的雷达斜距;  $\eta_{i,m}$  表示第  $m$  模糊区的第  $i$  个下视角对应的雷达入射角;  $R_{i,0}, \eta_{i,0}$  表示信号区第  $i$  个下视角对应的雷达斜距和入射角。

(7) 噪声等效后向散射系数

噪声等效后向散射系数

$$\sigma_n = \frac{4^4 \pi^3 R^3 v \sin(\eta - \alpha) k T B_r F L_{atm} L_{sys} L_{az}}{P_T G_T G_R \lambda^3 c \tau_p f_{pr} \sqrt{M}} \quad (8)$$

式中:  $\alpha$  为地面坡度;  $k$  为玻耳兹曼常数;  $T$  为接收机噪声温度;  $F$  为系统噪声系数;  $L_{\text{atm}}$  为大气传输损耗;  $L_{\text{sys}}$  为系统损耗;  $L_{\text{az}}$  为方位向损耗;  $P_T$  为峰值发射功率;  $G_T$  为发射天线增益;  $G_R$  为接收天线增益;  $M$  为多视数。对于每一 Burst 时间, 方位向中心和边缘处的目标分别被方位向天线以不同角度照射, 对应不同的方位向损耗及不同的噪声等效后向散射系数。

### 3 Burst 模式 SAR 实时成像算法

#### 3.1 算法流程

结合惯导测量数据与雷达回波数据, 设计机动平台 Burst 模式 SAR 实时成像算法。首先估计 Burst 回波的多普勒参数, 然后结合扩展线性调频变标 (extended chirp scaling, ECS) 算法<sup>[9]</sup>得到子孔径图像, 最后校正子孔径图像偏移并经多视处理, 得到 Burst 模式 SAR 图像。算法流程如图 7 所示。

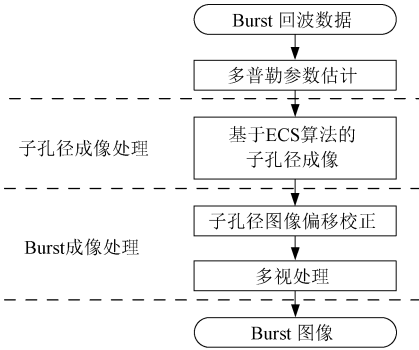


图 7 Burst 模式 SAR 实时成像算法流程图

多普勒参数估计包括多普勒中心频率估计与多普勒调频率估计, 估计过程中需要利用惯导数据和回波数据。利用多普勒中心频率估计结果  $f_{\text{Dc}}$ , 结合非迭代图像偏置算法<sup>[10]</sup>可以进行多普勒调频率估计, 此处不再赘述。

#### 3.2 子孔径成像处理

单个点目标的基带回波信号

$$s_0(t_r, t_a) = A_0 \omega_r \left( t_r - \frac{2R_s(t_a)}{c} \right) \omega_a(t_a - t_{ac}) \times \exp\left(-j \frac{4\pi f_c R_s(t_a)}{c}\right) \exp\left(j\pi K_r \left( t_r - \frac{2R_s(t_a)}{c} \right)^2\right) \quad (9)$$

式中:  $t_r$  为距离向快时间;  $t_a$  为方位向慢时间;  $A_0$  为一个复常数(后续推导忽略);  $\omega_r(\cdot)$  为发射脉冲包络;  $R_s(\cdot)$  为雷达至点目标的瞬时斜距;  $\omega_a(\cdot)$  为方位向双程天线方向图函数;  $t_{ac}$  为方位向慢时间中心;  $f_c$  为雷达载频;  $K_r$  为信号的线性调频率。

采用 ECS 算法完成回波数据的子孔径成像, 具体流程如图 8 所示, 详细过程参见文献[11]。图中 FFT/IFFT 表示快速傅里叶变换/逆变换。

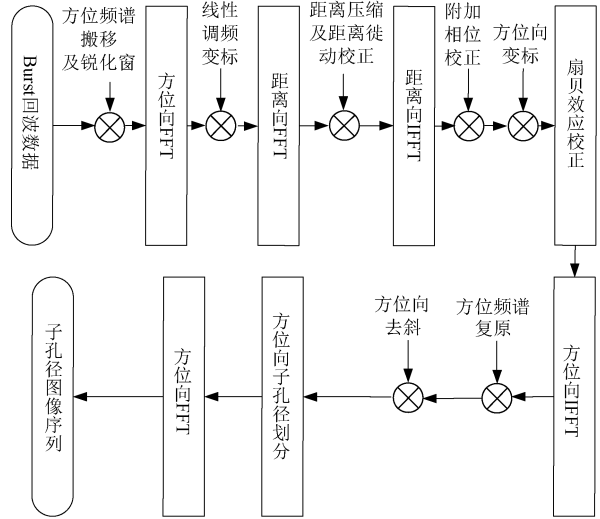


图 8 ECS 算法成像处理流程

#### 3.3 Burst 模式成像处理

由于单幅 Burst 模式 SAR 图像的理论方位向分辨率远高于实际应用要求, 容易想到采用子孔径划分, 结合匀速直线模型, 分别构造匹配滤波函数进行方位向聚焦。但是该方法需要获取每个子孔径内飞行器的平均速度, 运算量大且难以实现。

本文利用匀速直线模型对 Burst 数据进行方位向匹配滤波。以中心子孔径作为参考, 偏离中心的子孔径存在附加线性相位误差, 仅会导致子孔径图像的偏移, 而不会散焦。

对各子孔径图像进行整体偏移校正。先估计各子孔径图像相对于中心子孔径图像的偏移量, 按照子孔径序号对估计结果做线性拟合, 再根据拟合的偏移量值校正各子孔径图像的二维偏移。此时残余的子孔径图像偏移量已不再影响 Burst 成像效果, 经多视处理即可得到 Burst 模式 SAR 图像

$$s(t_r, t_a) = \sum_{i=1}^{M_s} |\text{FFT}(s_i(t_r, t_a))| \quad (10)$$

式中:  $M_s$  为子孔径数量;  $\text{FFT}(\cdot)$  表示快速傅里叶变换函数;  $s_i(\cdot)$  表示偏移量校正后的第  $i$  幅子孔径图像;  $|\cdot|$  表示取模值运算。实际划分子孔径数由方位向分辨率要求确定。

## 4 仿真实验及应用分析

以单幅 Burst 模式 SAR 图像的生成过程为例,分析本文算法的运算效率,并以每秒浮点运算次数(FLOPs)来表示其运算量。设距离向及方位向的采样点数分别为  $N_r, N_a$ , 每次距离向/方位向进行 FFT 和 IFFT 的浮点运算量为  $5N_r N_a \log_2 N_r$  和  $5N_r N_a \log_2 N_a$ , 一次复乘操作的浮点运算量为  $6N_r N_a$ , 则所提算法的运算量如表 1 所示。其中,  $N$  为多普勒中心估计所用回波数据块的距离单元数,  $\Delta N$  为多普勒调频频率估计中的距离向平均所用距离单元数。

表 1 所提算法的运算量汇总表

| 运算类型     | 运算量   |  |
|----------|---|--|
|          | 多普勒参数估计   | Burst 成像处理   |
| FFT/IFFT | $10N_r N_a \log_2(N_r N_a) + 25\Delta N N_a \log_2 N_a$   | $5N_r N_a \log_2(N_a/M_s) + 10N_r N_a \log_2(N_r N_a)$ |
| 复/实乘     | $6N(N_a - 1) + 18N_r N_a + 12\Delta N N_a$  | $54N_r N_a$  |
| 复/实加     | $N(N_a - 1) + 2(\Delta N - 1)N_a$   | $N_r N_a$  |
| 合计       | $20N_r N_a \log_2(N_r N_a) + 25\Delta N N_a \log_2(N_a) + 5N_r N_a \log_2(N_a/M_s) + 73N_r N_a + (14\Delta N - 2)N_a + 7N(N_a - 1)$ |  |

令  $N_r = 2\ 048, N_a = 4\ 096, N = 700, \Delta N = 50, M_s = 16$ , 估算出的总运算量约为 5.5 GFLOPs。

在 Matlab R2017a 版本上处理  $1\text{kB} \times 4\text{kB}$  大小的 Burst 模式 SAR 回波仿真数据。计算机硬件配置为 Intel(R) Core(TM) i7-6700 CPU @ 3.40 GHz, 生成单幅 Burst 模式 SAR 图像的总处理时长为 2.746 s。参考 Xilinx 公司 Virtex7 系列 xc7vx690t 型 FPGA 处理板, 其硬件加速比<sup>[12]</sup>一般在 10 以上, 即实际硬件处理时间将小于 0.27 s, 能够满足机动平台 Burst 模式 SAR 实

时成像的要求。

利用仿真数据验证算法的可行性。在观测场景内设置 9 个点目标, 斜视角为  $20^\circ$ , 机动平台按照最大过载进行恒加速飞行。仿真所用的雷达参数见表 2。

表 2 仿真所用雷达参数

| 参数                                       | 参数值 | 参数                  | 参数值  |
|--|-----|---------------------|------|
| 平台高度/km                                  | 18  | 脉冲宽度/ $\mu\text{s}$ | 5    |
| 平台速度/( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 3   | 脉冲重复频率/kHz          | 53.7 |
| 天线方位向波束宽度/ $^\circ$                      | 4.0 | 信号采样频率/MHz          | 75   |
| 天线距离向波束宽度/ $^\circ$                      | 4.0 | 波束中心下视角/ $^\circ$   | 22.5 |
| Burst 时间/ms                              | 50  | 斜视角/ $^\circ$       | 20.0 |

图 9 为未进行子孔径图像偏移校正的单幅 Burst 图像直接进行多视处理后得到的多视实图像, 图中 1~9 分别表示 9 个目标。

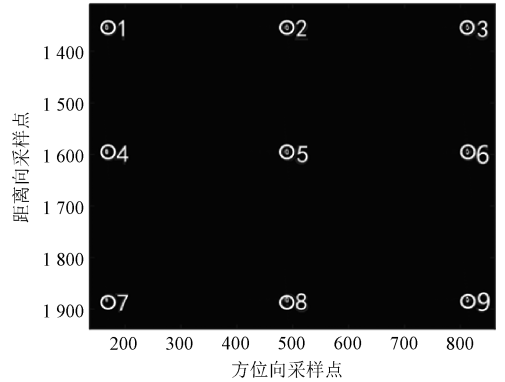


图 9 单幅 Burst 图像多视处理后 SAR 图像

提取图 9 中目标 1 的成像结果进行成像指标分析。目标 1 的方位向脉冲响应和距离向脉冲响应分别如图 10 和图 11 所示。进行图像拼接后得到多视 Burst 模式 SAR 图像。其成像指标评估结果如表 3 所示。

表 3 多视 Burst 模式 SAR 成像指标评估结果

| 指标类别  | 方位向   | 斜距    | 方位向峰值  | 距离向峰值  |
|-------|-------|-------|--------|--------|
|       | 分辨率/m | 分辨率/m | 旁瓣比/dB | 旁瓣比/dB |
| 理论值   | 7.86  | 3.02  | -13.26 | -13.26 |
| 偏移校正前 | 8.05  | 3.14  | -14.19 | -14.48 |
| 偏移校正后 | 7.89  | 3.07  | -13.22 | -13.99 |

由图 10、图 11 及表 3 可知, 经过子孔径偏移校正后, 点目标的二维脉冲响应仿真结果更接近 sinc 函数, 二维分辨率和峰值旁瓣比指标性能均有所提升, 基本达到了理论值。

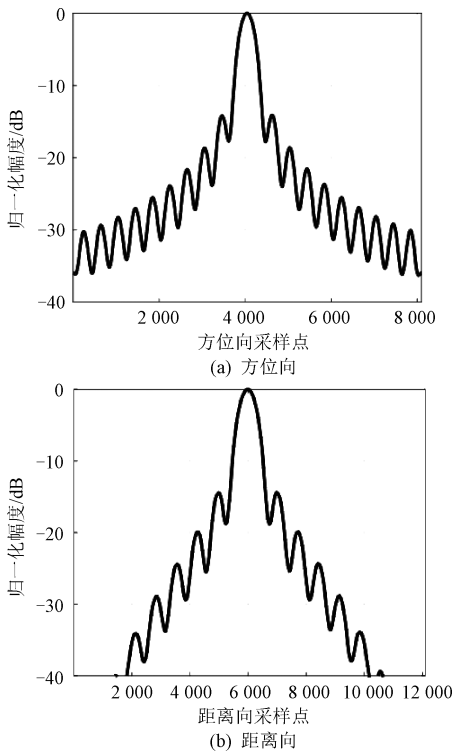


图 10 图像偏移校正前目标 1 的二维脉冲响应剖面图

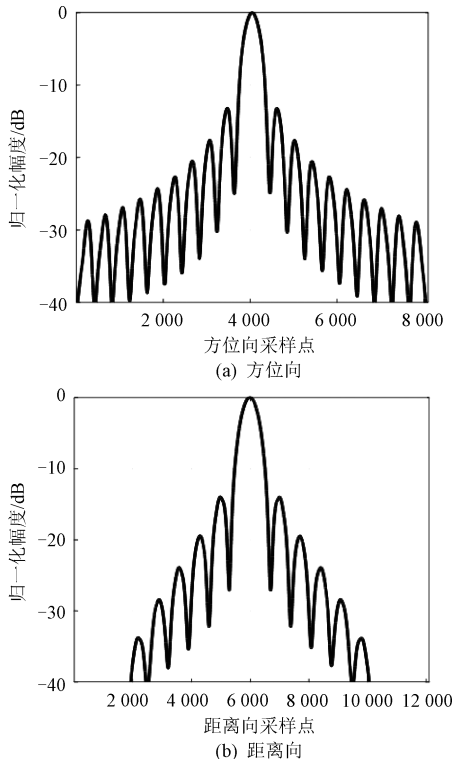


图 11 图像偏移校正后目标 1 的二维脉冲响应剖面图

## 5 结论

结合匹配导航的需求,提出了一种适用于机动平台的 Burst 模式 SAR 实时成像体制。采用 Burst 模式,解决 SAR 成像大幅宽与实时性的矛盾,进而给出系统参数设计方法。在此基础上提出一种机动平台平飞段大斜视实时成像算法,并给出适用于机动平台的雷达实时成像系统的设计仿真流程。所提算法对平台存储资源的需求低,实时性好,能够满足 Burst 模式 SAR 成像体制需求。

## 参考文献

- [1] 张明友,汪学刚. 雷达系统[M]. 4版. 北京:电子工业出版社,2013,45-47.
- [2] 江焯,李勇. 宽测绘带星载环视扫描 SAR 成像方案研究[J]. 雷达科学与技术,2018,16(3):249-255,266.
- [3] 吴照宪,吴海. 一种改善图像拼接效果的相控阵 ScanSAR 工作模式[J]. 2016,39(6):1-4,12.
- [4] HE F, CHEN Q, DONG Z, et al. Processing of ultrahigh-resolution spaceborne sliding spotlight SAR data on curved orbit[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(2): 819-839.
- [5] HE F, CHEN Q, DONG Z, et al. Modeling and high-precision processing of the azimuth shift variation for spaceborne HRWS SAR[J]. Science China (Information Sciences), 2013, 56(10): 102304.
- [6] SCHAEFER C, LOPEZ-DEKKER P. Interferometric Ka-band SAR with DBF capability[C]// 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar. [s.l.]: EUSAR, 2012: 7-10.
- [7] 王青松. 星载干涉合成孔径雷达高效高精度处理技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2011.
- [8] SAMCZYNSKI P, KULPA K. Non iterative map-drift technique[C]// 2008 International Conference on Radar. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008: 76-81.