

文章编号:2095-6134(2015)01-091-06

一种适合机载 SAR 变换模式的 PFA 成像处理方法^{*}

刘龙珠^{1,2†}, 王岩飞¹

(1 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

(2014 年 4 月 1 日收稿; 2014 年 4 月 10 日收修改稿)

Liu L Z, Wang Y F. Polar format algorithm for multi-mode airborne SAR imaging [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2015, 32(1): 91-96.

摘 要 针对机载合成孔径雷达(SAR)的实际需求,在详细分析条带转聚束模式的工作特点和对模式变换中的雷达回波信号进行精确建模的基础上,提出一种高效的成像处理方法.该方法通过运动补偿将条带成像与聚束成像相结合,并利用极坐标格式成像算法(PFA)对条带聚束变换模式进行成像,实现了模式变换前后数据处理结果的共用,既可以节省处理运算量 and 时间,也可以节省数据缓存空间,适合于机上实时成像处理器的实现.分析和仿真结果验证了方法的高效性和有效性.

关键词 合成孔径雷达; 模式变换; 实时成像处理; 极坐标格式成像算法

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **doi:** 10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2015. 01. 015

Polar format algorithm for multi-mode airborne SAR imaging

LIU Longzhu^{1, 2}, WANG Yanfei¹

(1 Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A high efficiency processing method for mode switch is proposed based on the requirements of airborne synthetic aperture radar (SAR). The features of the mode switch from stripmap to spotlight are well analyzed, and the precise echo signal model during the mode switch is established. By combining the processing steps by means of motion compensation, the polar format algorithm (PFA) is used for the multi-mode imaging. The processing results before and after the mode switch can be shared. Hence the processing efficiency is improved and hardware memory is reduced, which makes the method highly suitable for real-time imaging. Simulation results confirm the validity of the proposed method and show high efficiency.

Key words synthetic aperture radar (SAR); mode switch; real-time imaging; polar format algorithm (PFA)

随着机载合成孔径雷达(SAR)的发展,具备多种工作模式,并能在实际飞行中对各模式进行

灵活切换是对 SAR 系统面向实际应用提出的一个重要需求.在条带模式下,SAR 系统可以对大

^{*} 国家自然科学基金(61101201)资助

[†] 通信作者, E-mail: lzhliu0410@163.com

范围场景进行粗略成像;而在聚束模式下,则可以对小范围场景进行精细成像^[1-2]. 利用条带模式对场景成像过程中发现目标后,切换至聚束模式对该区域进行精细成像,则可以兼具条带模式大成像范围和聚束模式高分辨成像的优势,在目标搜索等领域具有广阔的应用前景.

从 SAR 的条带成像对目标搜索变换为聚束模式精细成像对目标识别的过程具有很强的时效性. 在搜索到目标后,立刻转为聚束模式,并尽快获得精细图像用于目标的辨识,同时需要目标图像能够不间断显示避免丢失.

虽然模式变换前后在条带和聚束模式下均可以使用相应的算法进行成像,然而,模式变换过程中由于同时具有条带数据和聚束数据,考虑到时效性的要求,需要有针对性更强的成像算法. 常规的处理方式是将切换前剩余条带数据进行舍弃,对切换后的聚束数据采用聚束成像算法进行成像. 这种处理方法在实时处理中会导致处理效率的降低,存储空间的浪费,甚至探测区域的间断.

针对这一问题,本文在详细分析条带转聚束模式的工作特点和对模式变换中的雷达回波信号进行精确建模的基础上,提出一种高效的成像处理方法. 该方法通过运动补偿将模式变换前的条带成像与模式变换后的聚束成像相结合,并利用极坐标格式成像算法,实现对条带聚束模式变换过程中的成像处理. 处理过程中通过对已处理过的条带数据加以利用,避免了存储空间的浪费和数据的二次处理,提高了实时成像的效率. 既可以节省处理运算量和时间,也可以节省数据缓存空间,非常适合于机上实时成像处理器的实现.

本文,首先介绍 SAR 模式变换的工作流程及信号模型;然后详细介绍所提出的新的成像方法及处理流程;之后给出对算法的性能进行分析和数值仿真验证的结果;最后给出本文工作的总结.

1 SAR 模式变换及其信号模型

雷达模式变换示意图如图 1 所示,从图中可以看出,雷达的工作模式从条带模式变换到聚束模式,在转换的过程中经历了滑动聚束模式,根据这 3 种工作模式可以将整个工作过程概括为 3 个阶段:

条带模式($P_1 \rightarrow P_2$) 雷达在 P_1 点到 P_2 点之间工作在条带前视模式,雷达波束方向与雷达

航线的夹角始终保持不变. 工作在条带模式的雷达主要任务是对大范围区域进行成像,根据实时成像的结果搜索感兴趣目标.

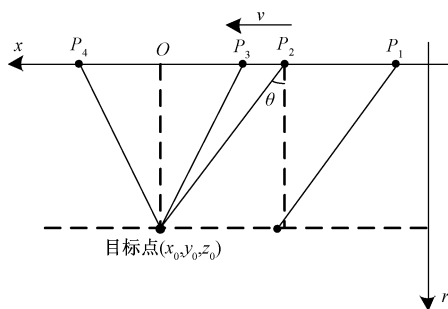


图 1 模式切换示意图

Fig. 1 Mode swapping

滑动聚束模式($P_2 \rightarrow P_3$) 当雷达在对目标的搜索过程中发现感兴趣目标时,雷达将工作模式立即调整到聚束模式,但由于硬件方面的原因,在模式转换过程中会出现时间延迟(延迟时间 $\eta < \frac{r_0 \tan \theta}{v}$),即从 P_2 到 P_3 点,可以将雷达近似看作工作在滑动聚束模式. 实际的数据处理中,由于条带到聚束模式的变换具有很高的时效性,因而该部分时间延迟很小,通常可忽略不计.

聚束模式($P_3 \rightarrow P_4$) 经过一段时间的延迟,雷达的工作模式在 P_3 点顺利地转换为聚束模式,因而在 P_3 点到 P_4 点雷达波束始终照射感兴趣目标区域,雷达工作在聚束模式.

根据这 3 个阶段,雷达的数据处理流程可以用图 2 表示.

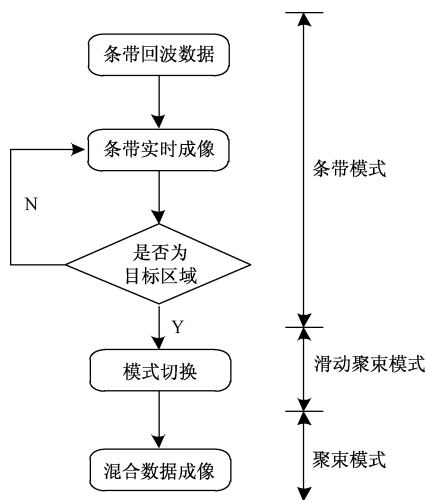


图 2 数据处理流程

Fig. 2 Flow chart of data processing

从图 2 中可以看出,在雷达模式变换过程中,涉及到条带模式、聚束模式和滑动聚束模式 3 种工作模式,需要针对这一过程建立相应的 SAR 成像信号模型。

假设载机在固定高度沿着平行于 X 轴方向作匀速直线运动,飞行速度为 v ,如图 3 所示.取成像区域中心坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,在载机飞行 t 时刻,雷达天线相位中心的坐标为 (x_a, y_a, z_a) ,目标区域中心到雷达平台的距离为 $r(t) = \sqrt{(x_a - x_0)^2 + (y_a - y_0)^2 + (z_a - z_0)^2}$, $r_0 = \sqrt{(y_a - y_0)^2 + (z_a - z_0)^2}$ 为目标区域中心到雷达平台的最近距离。

假设雷达在飞行期间,向目标区域连续发送调频率为 K_r 的线性调频信号,信号的表达式^[3]为

$$s(\tau) = a_0 \text{rect}\left(\frac{\tau}{T_p}\right) \exp\{j2\pi f_c \tau + j\pi K_r \tau^2\}, \quad (1)$$

其中, a_0 为雷达发射信号的幅度, T_p 为脉冲持续时间, f_c 为发射信号载频, τ 为距离快时间,

$\text{rect}(\cdot)$ 为矩形窗。

雷达接收到的点目标回波方程在条带模式和聚束模式下分别可以表示为^[4-5]:

$$\begin{aligned} s_{\text{strip}}(\tau, t) &= a_t \text{rect}\left(\frac{x_a - x_{ac}}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{\tau - \frac{2r(t)}{c}}{T_p}\right) \times \\ &\exp\left\{j2\pi f_c \left(\tau - \frac{2r(t)}{c}\right) + j\pi K_r \left(\tau - \frac{2r(t)}{c}\right)^2\right\}, \quad (2) \\ s_{\text{spot}}(\tau, t) &= a_t \text{rect}\left(\frac{\tau - \frac{2r(t)}{c}}{T_p}\right) \times \\ &\exp\left\{j2\pi f_c \left(\tau - \frac{2r(t)}{c}\right) + j\pi K_r \left(\tau - \frac{2r(t)}{c}\right)^2\right\}, \quad (3) \end{aligned}$$

其中, L 为雷达的合成孔径长度, t 为方位慢时间, $r(t)$ 为 t 时刻目标散射点与雷达平台间的瞬时距离, a_t 为雷达平台在 t 时刻接收到的回波信号幅度, c 为光速, x_a 为雷达平台的方位向位置, x_{ac} 为对应工作模式下载机飞行的中心坐标值。

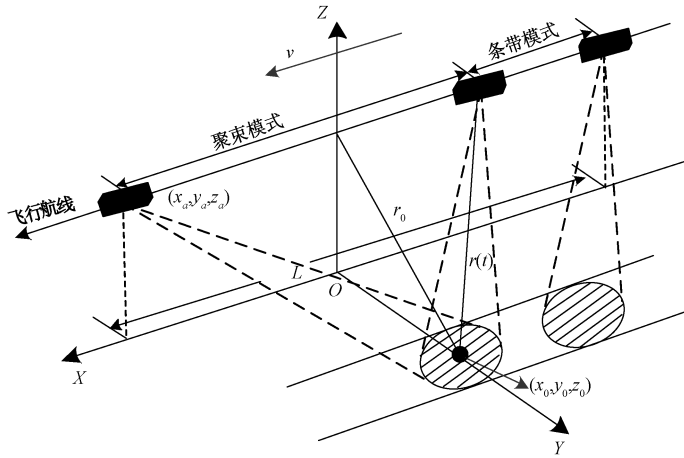


图 3 SAR 成像几何模型

Fig. 3 SAR geometrical model

2 基于变换模式的 PFA 成像方法及处理流程

在模式变换过程中,雷达接收的数据由条带数据和聚束数据共同组成.由于条带成像和聚束成像算法的本质都是对距离向和方位向进行匹配滤波的处理,因而可以考虑将模式变换前的条带成像与模式变换后的聚束成像相结合,从而实现模式变换前后成像处理结果的共用,节省处理的运算量和时间。

首先对雷达接收到的回波信号进行解线调频

(dechirp)处理,以去掉接收信号的 chirp 特性,完成距离向处理.条带 SAR 的成像区域为范围较大的带状区域,采用的参考解调信号为测绘带中心到雷达航线距离处的点目标回波信号,信号表达式^[6]为

$$\begin{aligned} s_{\text{ref}}^{\text{strip}}(\tau, t) &= \exp\{j2\pi f_c (\tau - 2r_s/c)\} \times \\ &\exp\{j\pi K_r (\tau - 2r_s/c)^2\}. \quad (4) \end{aligned}$$

聚束 SAR 的成像范围小,采用的参考解调信号为成像区域中心点目标的回波信号,信号的表达式为

$$s_{\text{ref}}^{\text{spot}}(\tau, t) = \exp\{j2\pi f_c (\tau - 2r_a(t)/c)\} \times$$

$$\exp\{j\pi K_r(\tau - 2r_a(t)/c)^2\}, \quad (5)$$

其中, r_s 为成像区域中心与雷达航线的距离, $r_a(t)$ 为雷达到目标成像区域中心点之间的距离.

条带模式和聚束模式的参考解调信号的不同, 导致信号在多普勒域的频谱也有所差别, 为了弥补这种差别, 需要对条带数据进行相位补偿处理, 补偿相位的大小为条带模式和聚束模式下参考解调信号所引入的相位差^[7], 具体表达式为

$$\varphi_{\text{comp}} = \varphi_{\text{ref}}^{\text{spot}} - \varphi_{\text{ref}}^{\text{strip}}, \quad (6)$$

其中, $\varphi_{\text{ref}}^{\text{spot}}$ 和 $\varphi_{\text{ref}}^{\text{strip}}$ 分别为聚束和条带参考解调函数的相位.

经过相位补偿后的条带数据具有与聚束数据相同的相位特性, 可以通过极坐标格式算法(PFA)对条带聚束数据进行统一成像, 解调后中频信号表达式^[8-10]为

$$s_{if}(\tau, t) = a_t \text{rect}\left(\frac{\tau - 2r(t)/c}{T_p}\right) \exp\{j\varphi(\tau, t)\}, \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} \varphi(\tau, t) = & -\frac{4\pi K_r}{c} \left(\frac{f_c}{K_r} + \tau - \frac{2r_a(t)}{c} \right) \times \\ & (r(t) - r_a(t)) + \frac{4\pi K_r}{c^2} (r(t) - r_a(t))^2. \end{aligned} \quad (8)$$

从(8)式可以看出, 中频信号的相位由2部分组成, 其中第1项包含成像区域的位置信息, 第2项为解调频处理带来的残余视频相位(RVP)项. 由于条带模式的引入, 导致RVP项不能忽略, 可以通过频域的相位相乘将其去除^[3], 相位函数为 $H(f_\tau) = \exp\left\{-j\frac{\pi f_\tau^2}{K_r}\right\}$.

去除RVP后信号的相位可表示为^[8-10]

$$\varphi(\tau, t) = -\frac{4\pi K_r}{c} \left(\frac{f_c}{K_r} + \tau - \frac{2r_a(t)}{c} \right) (r(t) - r_a(t)). \quad (9)$$

图4所示为雷达在数据采集平面内的几何关系图, 其中点P为雷达的瞬时位置, T为目标点的位置, O点为成像区域中心.

在三角形OPT中, 由几何关系式

$$r^2(t) = r_a^2(t) + \rho^2 - 2\rho r_a(t) \sin(\beta + \theta), \quad (10)$$

可得

$$r(t) - r_a(t) \approx -\rho \sin(\beta + \theta) +$$

$$\frac{\rho^2}{2r_a(t)} \cos^2(\beta + \theta), \quad (11)$$

其中, ρ 为目标点到场景区域中心的距离.

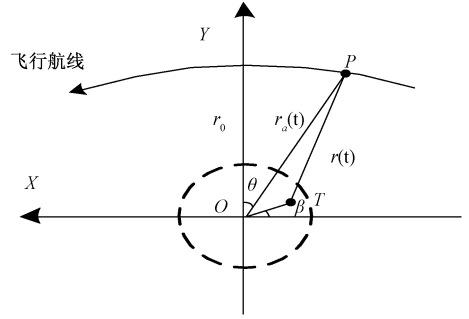


图4 数据采集平面几何图

Fig. 4 Data collection geometry

令 $K_R(\tau, t) = \frac{4\pi K_r}{c} \left(\frac{f_c}{K_r} + \tau - \frac{2r_a(t)}{c} \right)$, 信号的相位可以表示为

$$\begin{aligned} \varphi(\tau, t) = & K_R(\tau, t) \cdot \rho \sin(\beta + \theta) - \\ & K_R(\tau, t) \cdot \frac{\rho^2}{2r_a(t)} \cos^2(\beta + \theta), \end{aligned} \quad (12)$$

其中, 第1项表示目标点的位置信息, 第2项为距离弯曲项^[11]. 在条带到聚束模式变换过程中, 由于平面波假设不再成立, 必须对距离弯曲所造成的几何畸变进行补偿. 通过化简有

$$\varphi(\tau, t) \approx \left(X_t + \frac{X_t Y_t}{r_0} \right) K_x + \left(Y_t - \frac{X_t^2}{2r_0} \right) K_y, \quad (13)$$

其中, (X_t, Y_t) 为散射点在以场景区域中心为原点的坐标系中的位置. 从(13)式中可以看出, 由于距离弯曲的影响, 导致最终的目标点会出现几何畸变. 可以分别通过对方位向的插值和重采样处理, 以及距离向的相位相乘来实现对距离弯曲的校正, 从而得到校正后的点目标位置信息.

在实际的机载SAR实时成像系统中, 适于模式变换的成像处理流程如图5所示.

在模式切换过程中, 雷达依次工作在条带模式、滑动聚束模式和聚束模式. 当工作在条带模式时, 雷达每接收一条距离向信号, 即对该条信号进行距离压缩处理, 并沿距离向将其写入转置存储器中, 如此循环工作; 当雷达工作在滑动聚束模式下时, 由于该模式的持续时间较短, 可以将其近似为聚束数据进行处理; 当雷达工作模式切换到聚

束模式时,雷达对信号进行 dechirp 接收后同样沿距离向写入存储器中.在写满一个合成孔径时间长度的方位向数据之后,对条带数据部分进行条带转聚束处理,并将数据沿方位向逐条读出,进行后续的方位处理.在数据读出的过程中,通过跳读完成从距离向处理到方位向处理的转置.

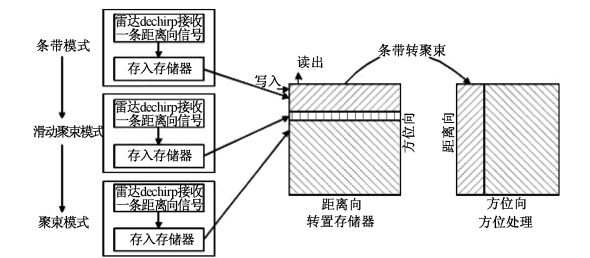


图 5 SAR 成像处理流程
Fig. 5 SAR imaging process

成像处理首先对条带和聚束数据进行距离向压缩,之后通过条带转聚束处理和方位向叠加继而完成方位向处理.从图 5 以及对成像处理流程的分析,可以看出该处理流程具有以下几方面的优点:

- 1) 能够对部分处理过的条带数据加以利用,减少运算量,降低数据存储,提高实时成像的效率;
- 2) 通过转置存储器的跳读能够很便捷地完成数据的转置存储,实现距离向处理到方位向处理的顺利过渡;

3) 该处理流程引入条带转聚束算法,能有效地弥补条带数据与聚束数据的差异,为接下来的方位向处理做了很好的铺垫.

3 仿真结果与分析

本文针对雷达从条带模式转换到聚束模式的工作过程,提出一种模式切换过程中的 SAR 成像处理算法,为了验证推导的正确性及处理方法的可行性,接下来对提出的算法进行仿真分析,仿真的参数采用典型的机载 SAR 参数,参数列表 1 所示.

表 1 典型机载 SAR 系统仿真参数
label 1 System parameters of airborne SAR

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|-----------------|-----|-----------|-----|
| 雷达工作频率/GHz | 9.4 | 方位向采样间隔/m | 0.3 |
| 最短中心距离/km | 30 | 合成孔径长度/m | 800 |
| 距离向调频率/(MHz/μs) | 10 | 距离采样率/MHz | 125 |
| 发射脉冲时宽/μs | 10 | 信号带宽/MHz | 100 |

仿真时以场景区域中心点为坐标原点,对 5 个点目标进行成像,以距离向为 x 轴,方位向为 y 轴,则目标点的坐标分别为 $(-20,20)$, $(20,20)$, $(0,0)$, $(20,-20)$, $(-20,-20)$.为了更好地对仿真结果进行分析,对相同参数下的聚束数据也同样进行了极坐标格式成像算法的仿真,点目标的仿真结果如图 6(a)所示,本文提出的基于运动

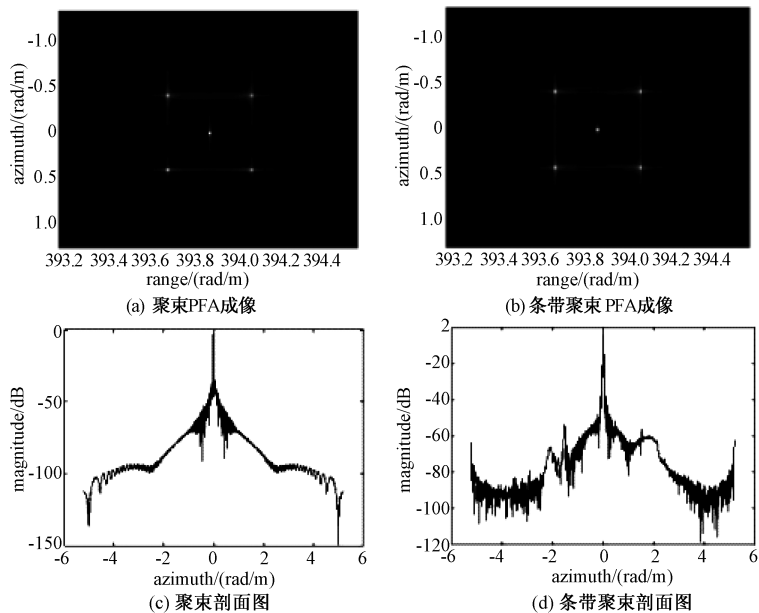


图 6 点目标仿真结果图
Fig. 6 Simulation results for point targets

补偿的 PFA 成像处理方法针对条带聚束混合数据(在一个合成孔径内,前 1/4 合成孔径长度内为条带数据,后 3/4 合成孔径长度内为聚束数据)进行处理,仿真结果如图 6(b)所示.从图 6 中可以明显地看出,本文成像处理方法能够获得跟聚束成像算法相当的目标分辨率.

为了更好地比较点目标的性能,取成像区域中心点进行分析,点目标在 2 种成像算法处理下的方位向剖面图如图 6(c)和图 6(d)所示,从图 6 中的仿真结果可以得出,聚束数据的 PFA 成像与本文所提的基于条带聚束混合数据的成像,具有同样的 3 dB 主瓣宽度,可以获得很好的方位向分辨率;峰值旁瓣比分别为 -36.13 dB 和 -33.66 dB,这是本文算法为了提高处理利用率,对 2 种情况下的处理进行结合带来的影响,这一结果在实际系统中是可以忽略的.

另一方面,从运算量上分析,在条带到聚束模式的变换过程中,由于成像区域范围较大,需要对目标的距离徙动进行校正,在本文给出的成像算法中,由距离弯曲带来的几何校正,可通过插值和相位相乘来实现,插值运算可以融合到对极坐标到直角坐标的二维插值处理中,因而不会给算法带来运算量的增加.设 $N_r = 2\,048$ 和 $N_a = 2\,048$ 分别为距离向的采样点数, $N_{a,\text{strip}} = 512$ 为条带数据在方位向上的采样点数,由于本文所提的处理方法,并没有将部分处理过的条带数据进行舍弃,而是将其与聚束数据结合,因此该部分条带数据所占的存储空间,即该处理方法在硬件存储空间上的减少量为 $N_r \times N_{a,\text{strip}} = 2\,048 \times 512 = 1\text{ M}$,相应的运算量的减少量为 $2 \times 5N_{a,\text{strip}}N_r \log_2 N_r = 11.5 \times 10^7$.由于条带数据的引入需要对数据进行距离弯曲的校正,忽略掉相位相乘所带来的影响,取插值核长度为 $M_{\text{ker}} = 8$,插值校正带来运算量的增加为 $2(2M_{\text{ker}} - 1)N_{a,\text{strip}}N_r = 3.1 \times 10^7$,总的来说运算量减少了 8.4×10^7 .可以看出,条带模式到聚束模式的成像处理方法大大降低了运算量,同时也节约了硬件存储空间,非常适用于机上的实时成像处理.仿真的结果验证了该成像处理算法在模式变换过程中的高效性和有效性.

4 总结

本文针对 SAR 模式变换过程中引起的成像处理问题进行了深入研究,通过详细分析模式切换过程中各阶段的工作特点及流程,建立了精确的回波模型,并基于该回波模型提出一种适用于模式变换的 PFA 成像处理方法.该方法通过将模式变换前的条带数据处理与模式变换后的聚束数据处理相结合,提高了数据的利用率及处理效率.本文给出了算法的详细推导过程及其在实际机载 SAR 实时成像系统中的数据处理流程,仿真结果表明了该方法在实时成像处理中的高效性及算法的可行性.

参考文献

- [1] 周芳,刘玉战. 基于模式融合的混合 SAR 成像算法[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(5): 178-181.
- [2] Belcher D P, Baker C J. High resolution processing of hybrid strip-map/spotlight mode SAR[J]. IEE Proc-Radar, Sonar Navig, 1996, 143(6): 366-374.
- [3] 保铮,刑孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005: 24-30,70-87.
- [4] 唐禹,王岩飞,张冰尘. 滑动聚束 SAR 成像模式研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(1): 26-29.
- [5] 刘寒艳,宋红军,程增菊. 条带模式、聚束模式和滑动聚束模式的比较[J]. 中国科学院研究生院学报, 2011, 28(3): 410-417.
- [6] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight synthetic aperture radar signal processing algorithms[M]. Boston: Artech House, 1995: 357-360.
- [7] Yeo T S, Tan N L, Lu Y H, et al. A Stripmap to spotlight converting algorithm[J]. Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Seattle, 1998: 1 168-1 170.
- [8] An D X, Huang X T, Jin T, et al. Extended two-step focusing approach for squinted spotlight SAR imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(7): 2 889-2 900.
- [9] Yuan Y, Sun J, Mao S. PFA algorithm for airborne spotlight SAR imaging with nonideal motions[J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2002, 149(4): 174-182.
- [10] Walker J L. Range-doppler imaging of rotating objects[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980, 16(1): 23-52.
- [11] Wei Y E. An efficient algorithm to correct range curvature image distortion in spotlight SAR[C]//EUSAR'98. 1998: 123-126.