DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2020.02.007

高贺利[1]　陈杰[1]　杨威[1]　李春升[1]

一种宽幅星载 TOPSAR 数据高效成像算法

摘要

得益于天线波束方位向扫描技术,星载合成孔径雷达(SAR)能够在渐进扫描模式(TOPS)下实现宽测绘带观测.在TOPS模式下,SAR波束沿着方位向进行逆时针反复扫描,并在距离向上进行多次切换,从而获取多个图像切片(burst).为了获得均匀采样的完整成像结果,通常需要对各burst进行重采样,但这会增加额外的计算量,降低处理效率.本文提出了一种宽幅星载TOPSAR数据高效成像算法.首先,在去斜率操作中引入一种新的插值方法,可以灵活地调整最终图像的方位采样间隔,方便进行图像拼接.该方法避免了在聚焦处理前的补零操作,从而降低计算量.在此基础上,本文结合TOPS模式多burst的特点,设计了一种GPU并行处理架构,成倍地提高数据处理效率.最后,根据仿真数据进行了实验,验证了该成像算法的有效性和高效性.

关键词

合成孔径雷达(SAR);渐进扫描(TOPS);插值;图形处理单元(GPU)

中图分类号 TN958

文献标志码 A

收稿日期 2019-10-16

资助项目 国家自然科学基金(61861136008,61701012);中央高校基本科研业务费项目(YWF-19-BJ-J-304)

作者简介

高贺利,男,博士,研究方向为星载合成孔径雷达技术.gaohl@buaa.edu.cn

杨威(通信作者),男,博士,副教授,研究方向为星载合成孔径雷达技术.yangweigigi@sina.com

1　北京航空航天大学 电子信息工程学院,北京,100191

0　引言

合成孔径雷达(SAR)在环境监测、地质测量、减灾救灾等地球观测领域发挥着重要作用.利用方位天线波束扫描技术,SAR可以工作在滑动聚束[1-2]和渐进扫描(TOPS)[3-4]模式下,其中TOPS模式比传统条带模式具有更大的观测范围,同时也避免了扫描(SCAN)模式中的扇贝效应.

在TOPS工作模式中,对于沿方位向分布的目标,由于方位波束的扫描,其多普勒历程存在空变性,它们的多普勒中心频率随方位位置线性变化,从而扩展了TOPS回波信号的整体频谱宽度.同时由于系统设计的限制,系统脉冲重复频率(PRF)通常小于TOPS回波信号的整体带宽,导致了频谱混叠现象和时域混叠现象.这种情况下,传统的成像算法并不适用于TOPSAR数据处理.为了解决这一问题,多种成像算法被相继提出.首先,频谱拼接法[5]将信号频谱进行重新拼接,从而消除了频谱混叠,实现图像聚焦,但该方法需要复杂的切分、拼接等操作,效率较低.随后,子孔径处理[6]方法被引入到TOPS处理中,并在TerraSAR-X中得以运用,但它同样需要进行子孔径分块、拼接等复杂操作.之后,杨威等提出了三步聚焦成像算法[7-8],该算法采用去旋转操作和去斜坡操作来克服混叠,实现全口径聚焦,有效地提高了处理效率.

然而,在这些算法中,均没有考虑不同burst(图像切片)间系统参数的不一致性.由于不同burst的PRF、方位向采样点数等参数不同,导致各burst最终图像的采样间隔存在不一致.为了实现最终的拼接图像的均匀采样,需要进行额外的重采样操作,这影响了整体的处理效率.同时,多个burst数据通常是在中央处理器(CPU)中串行处理,这也限制了处理效率的提高.

本文针对TOPSAR数据处理面临的效率问题,提出了一种宽幅星载TOPSAR数据高效成像算法.首先,本文回顾了三步成像算法,并针对算法中PRF的变化进行了详细分析.基于此,提出了一种插值方法,能够与三步成像算法兼容,并保证最终图像的方位向采样间隔的一致性.然后,基于TOPSAR数据多burst的特点,提出了基于GPU(图形处理单元)的高效并行处理架构.最后通过仿真数据验证了该算法的有效性和高效性.

1 TOPSAR 工作模式与三步成像算法

1.1 TOPSAR 工作模式

与条带模式相比,星载 SAR 工作在 TOPSAR 模式下能够在二维实现更宽的观测.TOPS 工作模式现在已经被许多 SAR 卫星所采用,特别是 Sentinel-1A 卫星采用 TOPS 作为默认成像模式.图 1 给出了 TOPSAR 的工作模式及其成像几何关系.如图 1a 所示,SAR 传感器在每个 burst 内,波束从后向前逆时针旋转,在完成该 burst 的扫描后,波束指向下一个距离视角,再次进行方位向扫描.当距离向视角变化完成一个周期后,重新回到第一视角,继续扫描,此时波束照射到的场景与前一次循环中的该视角下照射的场景是连续的,在系统设计中会有一部分重叠区域.图 1b 中所示的 TOPSAR 的几何模型,方位波束随着平台运动不断旋转,指向虚拟旋转点.其中 T 表示该 burst 照射时间,X_{swath} 表示方位向场景宽度,$X_{\Delta\theta}$ 表示波束脚印长度,ω_θ 表示波束扫描角速度,r_s 表示 SAR 传感器到虚拟旋转点的距离,r_0 表示零多普勒时刻 SAR 传感器到场景中心的距离.需要说明,在 TOPS 模式下,r_s 值为负.

由于 TOPSAR 信号处理难度主要在方位向信号处理上,因此本文仅仅考虑方位向信号处理.假设方位波束在每个 burst 中以固定角速度旋转,那么 TOPSAR 方位信号可以表示为

$$s^{(1)}(t,t_d)=W_a\left[\frac{Yvt-vt_d}{X_{\Delta\theta}}\right]\text{rect}\left[\frac{t}{T}\right]\text{rect}\left[\frac{vt_d}{X_{\text{swath}}}\right]\cdot \exp\{-j\pi f_r(t-t_d)^2\}, \tag{1}$$

其中,t 表示方位向慢时间,t_d 表示场景内任一点目标的方位时间.$W_a(\cdot)$ 表示方位向天线方向图,rect[·] 表示矩阵窗函数,Y 和 f_r 分别表示旋转度因子与多普勒调频率:

$$Y=\frac{r_s-r_0}{r_s}, \tag{2}$$

$$f_r=\frac{2v^2}{\lambda r}, \tag{3}$$

其中,λ 表示波长.在式(1)中,采用了斜视等效模型,并忽略了斜距历程高次项.

1.2 三步成像算法

由于天线方位波束旋转,使得整个频谱在多普勒域内沿目标方位位置产生扩展.由于系统 PRF 仅大于单点的多普勒带宽,考虑到场景内所有目标,多普勒频谱必然发生混叠.因而传统的成像算法不能直接用于处理 TOPSAR 数据.三步聚焦算法是一种有效的算法,该算法能够克服时间域和多普勒域的混叠.

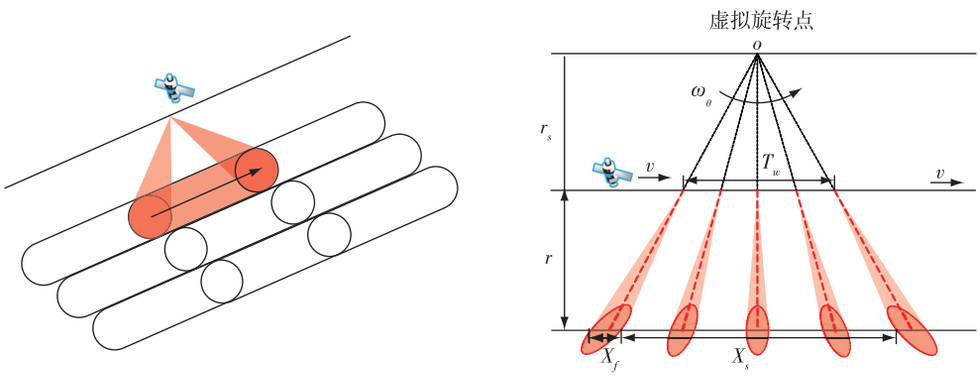
首先,为了克服多普勒频谱混叠,第一步先进行去旋转操作:

$$s^{(2)}(t,t_d)=s^{(1)}(t,t_d)\otimes\exp(-j\pi f_\omega t^2), \tag{4}$$

其中,$f_\omega=-\frac{2v^2}{\lambda r_s}$. 这一步之后,信号的采样频率得到了提升,同时信号中扭曲的频谱也得到了校正,频谱的混叠得以校正.

在第二步中,多种处理内核可以用来进行图像聚焦,例如,$\omega-k$,CS (Chirp Scaling) 和 FS (Frequency Scaling) 等.在本文中,采用 CS 算法.在第二步完成图像聚焦后,方位向信号在图像域依然存在混叠.为了消除这种混叠,第三步中对数据进行去斜处理.

对第二步聚焦后的数据进行快速傅里叶变换(FFT),它在多普勒域的表达式为



a. TOPSAR工作模式　　b. TOPSAR几何模型

图 1　TOPSAR 工作模式与几何模型

Fig. 1　Working mode (a) and geometric model (b) of TOPSAR

$$S^{(2)}(f)=W_a\left[-\frac{f+f_x t_d}{B_{3\mathrm{dB}}/Y}\right]\mathrm{rect}\left[-\frac{f+f_r t_d}{Tf_r}\right]\mathrm{rect}\left[\frac{vt_d}{X_{\mathrm{swath}}}\right]\exp\left\{j\pi\frac{f^2}{f_\omega}\right\},\tag{5}$$

其中,$f_x=\dfrac{2v^2}{\lambda(r_s-r_0)}$,$B_{3\mathrm{dB}}$ 表示波束的 3 dB 宽度.

在第三步的去斜处理中,式(5) 中的二次相位将会补偿掉,然后通过相位相乘引入一个新的二次调制相位,如下:

$$H_1(f)=\exp\left\{-j\pi\frac{f^2}{f_\omega}\right\}\exp\left\{-j\pi\frac{f^2}{f_x}\right\}.\tag{6}$$

然后,再应用 FFT,将数据变换为时域,再进行一次相位相乘和傅里叶变换即可得到无混叠全孔径图像.该相位表达式为

$$h(t)=\exp\{-j\pi f_x t^2\}.\tag{7}$$

2 新的插值方法

2.1 PRF 的变化

在三步成像算法中,由于进行了去旋转和去斜操作,信号的 PRF 在这两个操作后会发生变化,使得最终图像的 PRF 与系统的 PRF 不再一致,而是受到多个系统参数与方位处理点数的影响.

从 1.2 节可知,去旋转操作本质上是对信号进行了卷积操作.令 f_{prf} 表示系统的脉冲重复频率,则处理后的 PRF 可以用下式表示:

$$f_{\mathrm{prf},1}=\frac{N_{a,1}\cdot f_\omega}{f_{\mathrm{prf}}},\tag{8}$$

其中,$N_{a,1}$ 表示处理的方位向点数.为了保证 $f_{\mathrm{prf},1}$ 比信号的 3 dB 波束带宽大,通常需要对信号进行补零操作,因此,$N_{a,1}$ 中包含了补零的点数.

在完成方位聚焦后,第三步去斜前,信号的方位向采样频率均为 $f_{\mathrm{prf},1}$,当完成去斜操作的最后一项傅里叶变换后,信号的方位采样频率变为

$$f_{\mathrm{prf},2}=\frac{N_{a,2}\cdot f_x}{f_{\mathrm{prf},1}},\tag{9}$$

其中,$N_{a,2}$ 表示进行去斜处理时的方位向点数,包含补零的点数.将式(8) 代入(9),可得:

$$f_{\mathrm{prf},2}=\frac{N_{a,2}}{N_{a,1}}\cdot\frac{1}{Y}\cdot f_{\mathrm{prf}}.\tag{10}$$

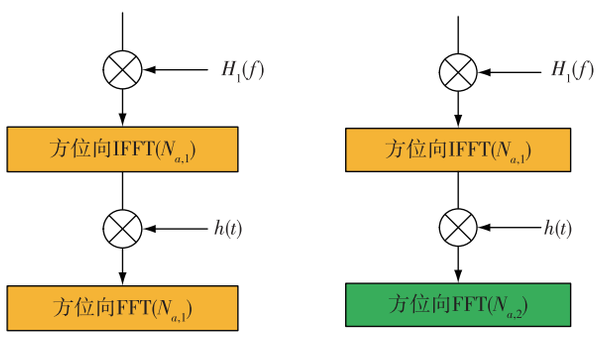
在三步聚焦成像算法中,$N_{a,1}$ 与 $N_{a,2}$ 是相等的,此时最终图像的采样频率为

$$f_{\mathrm{prf},2}=\frac{1}{Y}\cdot f_{\mathrm{prf}}.\tag{11}$$

因此,在三步聚焦成像算法中,最终图像的采样频谱与系统的 PRF 和旋转因子有关.对于距离向不同视角下的 burst,系统 PRF 通常也是不同的.采样频率的不一致为图像的拼接带来更多的处理负担.

2.2 新的插值方法

从式(10)可以看出,如果第三步去斜操作中,处理的信号点数 $N_{a,2}$ 与 $N_{a,1}$ 不相等,那么最终图像的采样率则会变化.因此,可以通过调整 $N_{a,2}$ 的大小,使得最终图像采样率变得一致.改变前后的去斜处理流程如图 2 所示.



a. 改进前去斜操作流程　　b. 改进后去斜操作流程

图 2　改进前后去斜操作流程

Fig. 2　Flowchart of de-ramp operation before (a) and after modification (b)

在实际数据处理中,可以先根据式(11)计算出各 burst 最终图像的 PRF,然后根据一定的规则,设定一个合理的 PRF.一种自然的选择方式是取它们的平均值作为最终图像的 PRF,记为 $f_{\mathrm{prf,ave}}$.然后再根据式(9)计算出需要在去斜处理中采用的 $N_{a,2}$,为

$$N_{a,2}=\left[\frac{f_{\mathrm{prf},2}\cdot f_{\mathrm{prf},1}}{f_x}\right],\tag{12}$$

其中,[·]表示取整.由于 $N_{a,2}$ 必须为整数,因此造成最终得到的图像采样率与设定的 $f_{\mathrm{prf,ave}}$ 存在细小的差别.这个误差可以通过轻微调整 f_x 的值使得最后的采样率完全一致.

3 基于 GPU 的宽幅星载 TOPSAR 数据并行处理架构

为实现宽测绘带观测,TOPS 工作模式中,通常沿距离向和方位向需要进行多个 burst 扫描,然后再通过地面数据处理,合成一幅宽覆盖的大图,以达到 100 km 以上的观测幅宽.在传统的数据处理系统中,这些 burst 需要顺序通过 CPU 的处理,分别得到成像结果后,再进行图像拼接才能完成全部流程,效率

比较低.

近年来,随着硬件技术的不断进步与发展,GPU在数据处理中应用越来越广,起到了越来越重要的作用.利用GPU的并行处理能力,可以快速提高数据处理能力.一方面,在TOPSAR成像处理中,主要运算为FFT操作与复数点乘,适合发挥GPU的优势,快速完成每个burst的处理;另一方面,对于大型的数据处理系统,通常能够搭载很多GPU显卡,因此,通过合理的分配,可以同时调用多块GPU处理器,分别处理多个burst数据,从而使得处理效率得到数倍的提升.

在获取全部TOPS数据后,先将各burst数据的处理参数进行计算,依据式(12)计算各burst的去斜点数.然后,根据GPU处理器数量,分配处理资源,完成各burst数据的成像处理.由于处理得到的各子图像具有一致的采样间隔,依据方位时序与距离视角,可以直接进行图像拼接.最后完成图像的几何校正,得到最终的图像产品.在每个burst数据处理过程中,由于需要方位向和距离向两个维度的FFT,不可避免需要数据转置操作,另外还有补偿矩阵的构建,这两方面均需要不断地申请内存.为了缩减内存开辟的次数,可以根据数据大小,在开始处理时,只申请一次内存,在后面的处理中反复调用,这样能够进一步缩减处理时间.基于GPU的宽幅星载TOPSAR数据并行处理架构如图3所示.

4 仿真实验

本节将利用仿真数据,对提出的算法进行验证,主要验证算法的有效性和高效性.

4.1 仿真成像实验

本小节主要通过点目标仿真实验,对提出的宽幅星载TOPSAR数据高效成像算法进行验证,通过评估点目标的成像质量,验证算法的有效性.实验仿真参数如表1所示.

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	值
波长/m	0.03
下视角/(°)	30
轨道高度/km	630
轨道偏心率	0.001 1
轨道倾角/(°)	98
PRF/Hz	3 000
脉冲宽度/μs	10
带宽/MHz	20
采样率/MHz	25
天线长度/m	8
旋转因子	3.86
$N_{a,1}$	8 192
$N_{a,2}$	8 429

在场景中布设3×3点阵目标,其中方位向点阵间隔15 km,距离向点阵间隔15 km,如图4所示.利用表1参数进行回波仿真,然后应用本文所提出的一种高效成像算法进行成像处理.图5给出了点1、点5和点9的成像结果,9个点目标的成像质量如表2所示.

从图5的成像结果及表2的点目标成像各项指标可以看出,本文提出的宽幅星载TOPSAR数据高效成像算法能够实现数据的良好聚焦,成像结果指

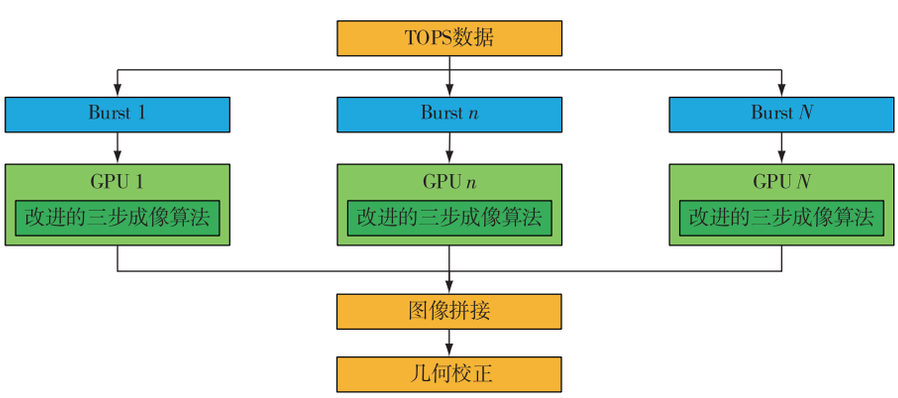


图3 基于GPU的宽幅星载TOPSAR数据并行处理架构

Fig. 3 Parallel processing framework of wide swath spaceborne TOPSAR data based on GPU

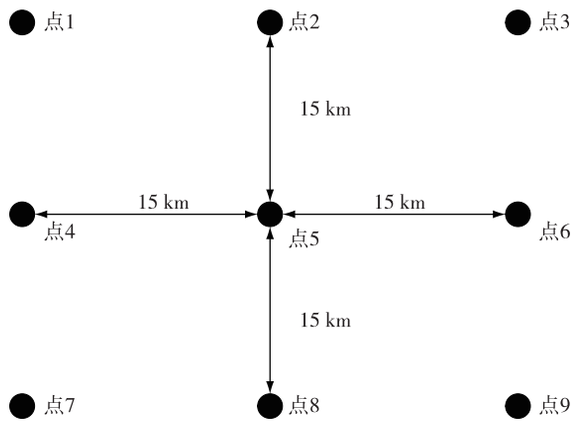


图 4　场景设计

Fig. 4　Scene layout

标和理论值保持一致.表 2 中,近距的点 1、点 4 和点 7 的方位分辨率优于远距的点 3、点 6 和点 9,这是由 TOPSAR 的体制决定的,具体分析可参考文献[8].

4.2　效率仿真实验

本小节拟利用 GPU 与传统 CPU 数据进行处理,对比处理效率.处理数据为 12 组 TOPS 数据,距离向 4 个 burst,方位向 3 个 burst,参数如表 1 所示,各 burst 仅 PRF 与 $N_{a,2}$存在区别.处理环境及处理时间如表 3 所示.从处理时间上对比,GPU 能缩短数倍的计算时间.

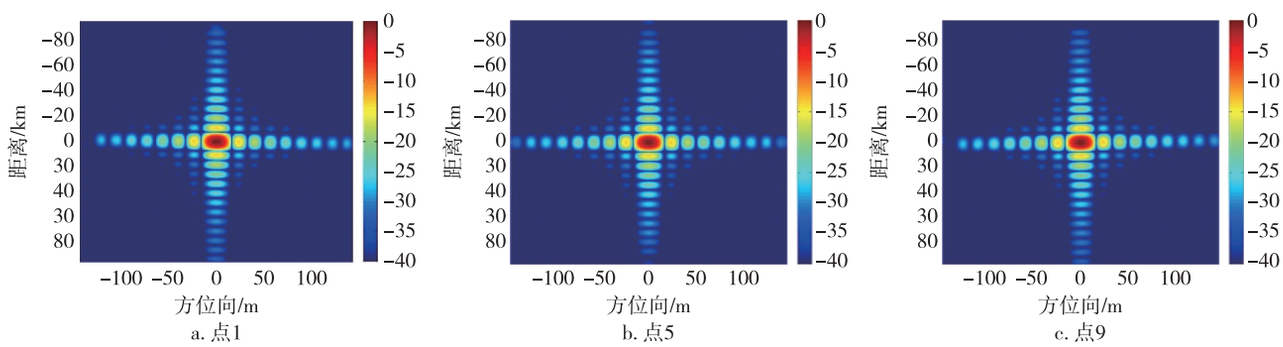


图 5　点目标成像结果

Fig. 5　Imaging results of point targets

表 2　成像质量

Table 2　Imaging qualities of point targets

目标点	方位向			距离向		
	分辨率/m	峰值旁瓣比/dB	积分旁瓣比/dB	分辨率/m	峰值旁瓣比/dB	积分旁瓣比/dB
点 1	14.3	−13.3	−10.0	6.6	−13.3	−10.0
点 2	14.4	−13.2	−10.0	6.6	−13.2	−10.0
点 3	14.5	−13.2	−10.0	6.6	−13.2	−10.0
点 4	14.4	−13.2	−10.0	6.6	−13.2	−10.0
点 5	14.4	−13.2	−10.0	6.6	−13.2	−10.0
点 6	14.5	−13.3	−10.0	6.6	−13.2	−10.0
点 7	14.4	−13.3	−10.0	6.6	−13.2	−10.0
点 8	14.4	−13.2	−10.0	6.6	−13.3	−10.0
点 9	14.5	−13.2	−10.0	6.6	−13.2	−10.0

5　结论

本文针对星载 TOPSAR 模式面临的数据处理效率的问题,提出了一种宽幅星载 TOPSAR 数据高效成像算法,并通过理论推导及仿真实验验证了算法的有效性及高效性,极大减少了 TOPSAR 数据拼接及串行处理造成的时间成本.本算法在三步成像算法的基础上,无需增加额外的处理步骤,可在成像过程中完成图像的重采样,避免了图像拼接前的插值处理,是一种高效的处理算法,同时保持了三步成像算法的精确性,适合于宽覆盖多 burst 的星载 TOPSAR 数据的处理.同时,本算法将 TOPS 模式数据分 burst 获取的特点与 GPU 并行处理的优势相结合,大幅提升了数据处理效率.

表 3 处理环境及处理时间

Table 3 Processing environments and time consumed

	环境	处理时间/min
1	高性能台式工作站 CPU:英特尔第八代 Xeon 处理器; 内存:三星 32 GB DDR4 ECC REGS 2133; 系统盘:1 TB SSD; 数据硬盘:2 TB SATA 企业级 7 200 转服务器硬盘; 操作系统:Windows 7	20
2	高性能台式工作站 CPU:英特尔第八代 Xeon 处理器; GPU:4 块 Tesla K40C 丽台显卡 内存:三星 32GB DDR4 ECC REGS 2133; 系统盘:1 TB SSD; 数据硬盘:2 TB SATA 企业级 7 200 转服务器硬盘; 操作系统:Windows 7	5

参考文献

References

[1] Mittermayer J, Lord R, Borner E. Sliding spotlight SAR processing for TerraSAR-X using a new formulation of the extended chirp scaling algorithm[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003,3:1462-1464

[2] Lanari R, Zoffoli S, Sansosti E, et al. New approach for hybrid strip-map/spotlight SAR data focusing[J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2001, 148(6):363-372

[3] De Zan F, Monti Guarnieri A. TOPSAR: terrain observation by progressive scans[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(9): 2352-2360

[4] Xu W, Huang P P, Wang R, et al. TOPS-mode raw data processing using chirp scaling algorithm[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(1):235-246

[5] Xu W, Huang P P, Deng Y K, et al. An efficient approach with scaling factors for TOPS-mode SAR data focusing[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(5):929-933

[6] Prats P, Scheiber R, Mittermayer J, et al. A SAR processing algorithm for TOPS imaging mode based on extended chirp scaling[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007:148-151

[7] Yang W, Chen J, Zeng H C, et al. A novel three-step image formation scheme for unified focusing on spaceborne SAR data[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2013, 137:621-642

[8] Yang W, Chen J, Liu W, et al. A modified three-step algorithm for TOPS and sliding spotlight SAR data processing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(12):6910-6921

An efficient imaging algorithm for spaceborne TOPSAR data

GAO Heli[1] CHEN Jie[1] YANG Wei[1] LI Chunsheng[1]

1 School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191

Abstract By steering antenna beam in along-track direction, space-borne synthetic aperture radar (SAR) can achieve wide swath coverage in Terrain Observation by Progressive Scans (TOPS) mode. In TOPS mode, the beam switches in range and steers along azimuth several times to perform wider swath both in range and azimuth. In order to obtain a whole imaging result with uniform azimuth intervals, the re-sampling operation is usually required, which means large computation load and low processing efficiency. In this paper, a modified three-step algorithm based on Graphics Processing Units (GPU) is proposed. Firstly, a new interpolation method is introduced into the de-ramp operation (the third step of the three-step focusing algorithm), which avoids the up-sampling operation and can conveniently adjust the azimuth interval of final images. Then, a parallel framework of GPU is designed to accelerate the imaging processing exponentially. Finally, experiments based on simulation data are conducted to verify the validness and efficiency of the imaging algorithm.

Key words synthetic aperture radar (SAR); terrain observation by progressive scans (TOPS); interpolation; graphics processing units (GPU)