

基于频域扩展和 SPECAN 的全孔径 TOPSAR 成像算法

陈 祺* 黄海风 何 峰 梁甸农 董 臻
(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘 要: TOPSAR(Terrain Observation by Progressive scans SAR)是星载 SAR 的一种新工作模式,这种工作模式在保持 ScanSAR 宽测绘带优点的同时,解决了扇贝效应(scalloping)等问题,具有广泛的应用前景。针对 TOPSAR 信号在时域和频域都混叠的特点,该文提出了一种新的全孔径 TOPSAR 成像算法,算法利用频域扩展来解决 TOPSAR 的频域混叠问题,利用 SPECAN(SPECTral ANalysis)技术来避免输出图像时域混叠,结构紧凑,处理效率较高。通过点阵目标和分布目标的仿真来验证了算法的有效性,并分析了算法的计算量,通过与几种现有的全孔径成像算法对比,说明了算法的高效性。

关键词: 合成孔径雷达; 扫描合成孔径雷达; 方位向电扫描合成孔径雷达(TOPSAR); 成像算法

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)10-2445-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00366

Full Aperture Imaging Algorithm of TOPSAR Based on Frequency Domain Extension and SPECAN

Chen Qi Huang Hai-feng He Feng Liang Dian-nong Dong Zhen

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Terrain Observation by Progressive scans SAR (TOPSAR) is a new and prospective mode of space-borne SAR. It keeps the wide swath advantage of ScanSAR, and solves the problems as scalloping. The signal of TOPSAR is alias in both frequency domain and time domain, to solve the problems, this article proposes a new full aperture imaging algorithm. The algorithm uses the frequency domain extension to solve the frequency domain alias and uses SPECTral ANalysis (SPECAN) technique to avoid the time domain alias of the output image. It is compact and efficient. Lattice-point targets and distribute targets are simulated to validate the algorithm. The amount of the computation is analyzed and the algorithm is compared with two existing full aperture algorithms to validate the effectiveness.

Key words: SAR; ScanSAR; Terrain Observation by Progressive scans SAR (TOPSAR); Imaging algorithm

1 引言

ScanSAR 是星载 SAR 实现宽测绘带的重要工作模式,传统的 ScanSAR 由于方位向天线加权不均匀,会受到扇贝效应的影响,对扇贝效应进行补偿比较困难,限制了传统的 ScanSAR 的应用^[1,2]。TOPSAR(Terrain Observation by Progressive scans SAR)通过天线在方位向上扫描,解决了传统 ScanSAR 系统的扇贝效应等问题。这种工作模式 2006 年由欧洲航天技术中心的 Attema 和意大利米兰理工大学的 Rocca 提出。目前, TOPSAR 模式已经在 TerraSAR-X 上实验成功。据报道,这种工作模式将计划用于欧空局 Sentinel-1 卫星^[3]。

在国内,这种工作模式也受到了相关单位的重

视,纷纷展开了研究。早在 2005 年南京航空航天大学朱岱寅等人就曾经做过相关研究并进行了机载实验,但当时只考虑到可以通过扫描扩大成像区域,并未考虑到通过在距离向多子带扫描可以扩展测绘带宽,限制了以后的发展^[4]。而在 TOPSAR 概念提出以后,国内许多学者也进行了跟踪研究^[5-8]。

对 TOPSAR 进行信号处理的关键在于如何有效地解决信号混叠问题而不显著增加计算量。针对这一问题,以往已有学者提出了一些成像算法^[1,5-7,9]。文献[1,6]中,作者通过复制拼接对数据进行升采样的预处理和后处理步骤进行成像,但一方面由于预处理和后处理步骤较多,而且预处理和后处理过程中会显著增加数据量,因此算法效率并不高。随后在文献[9]中,作者采用子孔径划分和 BAS(Baseband Azimuth Scaling)算法来避免频域和时域的混叠,但由于划分子孔径需要 PRF 相对瞬时带

2012-03-31 收到, 2012-07-16 改回

国家自然科学基金(61101187)资助课题

*通信作者: 陈祺 jy02051161@163.com

宽较高,同时子孔径拼接过程可能会影响成像质量,因此也有一定的局限性。文献[7]提出了一种效率较高的算法,但在最后由于选择了 BAS 对方向聚焦,因此不得不在后处理部分保留了一定的冗余数据,所以还有可以提升的空间。本文在这些算法的基础上,仔细分析现有算法的步骤,提出了利用频域扩展来解决 TOPSAR 的频域混叠问题,并利用 SPECAN(SPECtral ANalysis)技术来避免输出图像时域混叠的新算法,算法结构紧凑,处理效率较高。

本文第 2 节分析 TOPSAR 信号特点,第 3 节根据信号特点叙述算法步骤,第 4 节利用信号仿真验证了算法的有效性,同时与现在其他全孔径算法进行比较,说明了算法的高效性。

2 TOPSAR 信号分析

TOPSAR 的工作原理如图 1 所示。与 ScanSAR 相同, TOPSAR 也是一种多子带的宽幅工作模式。不同的是, ScanSAR 通过把一个主瓣的合成孔径时间分配到不同子测绘带之间来获取宽的测绘带,而 TOPSAR 则通过在每个子测绘带上扫描,使每个目标都受到天线方向图的完整照射,因此避免了 ScanSAR 的扇贝效应等问题^[1]。

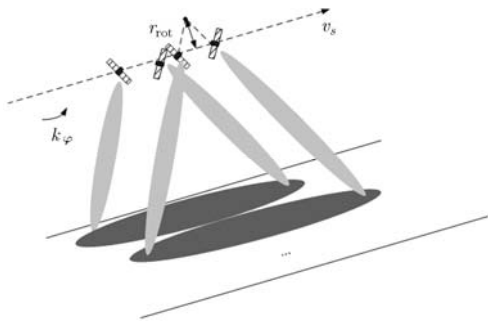


图 1 TOPSAR 的工作原理

TOPSAR 在距离向发射线性调频信号,通过脉冲压缩来获取距离向的高分辨图像。其信号特点主要在方位向,由于 TOPSAR 波束在方位向以 k_φ 的角速率进行扫描,信号的多普勒中心会随着慢时间的变化而变化,变化率为^[1]

$$K_c = -\frac{2v_s}{\lambda} k_\varphi = -\frac{2v_s^2}{\lambda r_{rot}} \quad (1)$$

其中 v_s 为卫星速度, k_φ 为转动角速率, λ 为雷达波长。转动斜距 r_{rot} 为一负值,大小等于 TOPSAR 工作时间中点位置到转动中心的距离。TOPSAR 的方位向时频关系可用图 2 表示。

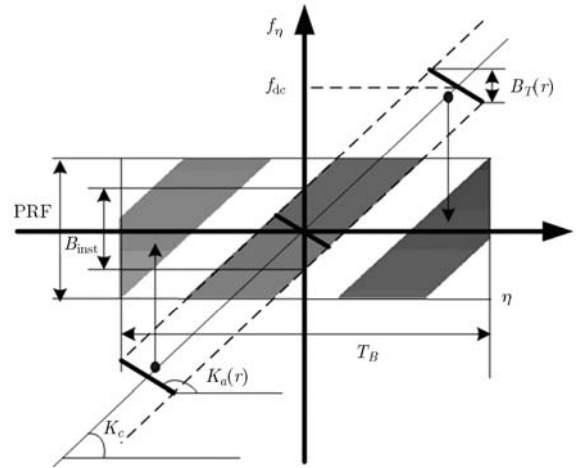


图 2 TOPSAR 信号时频图

图中,横坐标为方位慢时间,纵坐标为多普勒频率,着色部分表示信号区,颜色的深浅表示频率的高低,由于方位向信号以 PRF 进行采样,所以低频部分和高频部分会折叠到基带。 T_B 表示脉冲串持续时间, B_{inst} 表示瞬时带宽, $B_T(r)$ 表示斜距为 r 处的目标的多普勒带宽。TOPSAR 的分辨率要比雷达工作在条带模式时低,而且分辨率还会随着斜距的变化而变化,如果定义展宽系数为

$$\beta(r) = 1 - r / r_{rot} \quad (2)$$

则 TOPSAR 的分辨率就为 $\rho_{a,strip}\beta(r)$ ^[1,7]。其中, $\rho_{a,strip}$ 为雷达工作在条带模式时的分辨率。TOPSAR 信号经过聚焦处理后,各目标将位于其零多普勒位置,经聚焦处理后的图像长度会远大于脉冲串的工作时间长度,因此 TOPSAR 会造成时域混叠。同时, TOPSAR 信号总带宽大于 PRF,信号在多普勒域也是混叠的。

3 成像算法流程

本文的算法流程如图 3 所示,算法可以分为 3 个部分,第 1 部分是预处理部分,采用复制拼接的方法来进行频域扩展,避免频域混叠;第 2 部分是 CS(Chirp Scaling)聚焦算法,从距离多普勒域开始,对图像进行聚焦;第 3 部分是后处理部分,运用 SPECAN 算法对图像进行方位聚焦。下面,分别对各部分进行介绍。

3.1 预处理部分

本文的预处理算法仅包含一步方位 FFT 和一步复制拼接,处理的目的在于扩展信号频域,使数据在频域不混叠。预处理需要进行的升采样倍数可以由式(3)决定:

$$M_{pre} = \left\lceil \frac{B_{inst} + K_c T_B}{PRF} \right\rceil \quad (3)$$

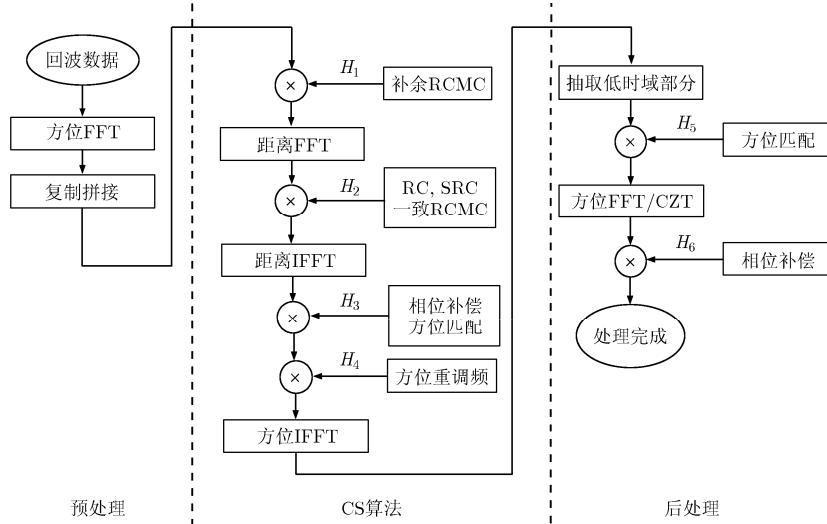


图3 TOPSAR 成像算法流程图

为便于理解，用图4说明预处理步骤。

经过预处理步骤，数据的时域宽度仍为 T_B ，而频域宽度变为 $M_{pre} \cdot PRF$ ，有用信号部分在频域已经不混叠，只需要在第3步进行提取即可。

3.2 CS 算法部分

本文算法的第2部分为CS算法部分，主要包含对数据的距离压缩(RC)，二次距离压缩(SRC)和距离迁徙校正(RCMC)，各参考函数与传统CS算法相同，具体可参考文献[9,10]。需要说明的是，由于本文在预处理部分已经将方位向数据变到多普勒域，所以CS算法可以直接从方位FFT后的部分进行处理。算法的重调频函数 H_4 与其他算法不同，为了使后处理能够用SPECAN技术进行方位匹配聚焦，需要对聚焦后的数据进行重调频，重调频函数为

$$H_4 = \exp\left\{-j\pi \frac{1}{K_{scl}} f_\eta^2\right\}, K_{scl} = -\frac{2v_s^2}{\lambda r_{scl}} \quad (4)$$

其中 f_η 表示多普勒频率， K_{scl} 为重新调频后的调频斜率， r_{scl} 为与其对应的斜距。方位匹配及重调频的步骤的时频率图变化可用图5说明。

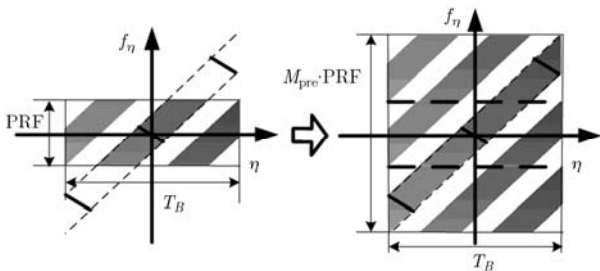


图4 预处理示意图

图5中，粗的黑实线表示点目标，为说明问题，只画出了有效数据部分。经过重调频后，与数据的多普勒中心的调频率 $K'_c(r)$ 对应的调频斜距可以表示为

$$r'_{rot}(r) = r_{rot} - r + r_{scl} \quad (5)$$

其中 r_{rot} 为图1所示的转动斜距， r 为斜距，调频斜距 r_{scl} 应在近端斜距和远端斜距之间，需要满足：

$$\Delta r \triangleq r_f - r_n \leq |r_{rot}|(\alpha_{os} - 1) \frac{B_{inst} + K_c T_B}{PRF} \quad (6)$$

其中 r_n 表示近端斜距， r_f 表示远端斜距， $\alpha_{os} = PRF / B_{inst}$ 为过采样率。这样的情况不一定能够满足的，此时直接使用FFT不能保证可以选择到合适的调频斜距，可以使用一个随距离变化的调频斜距 $r_{scl}(r) = r - r_{rot}$ ，以保证处理后的信号在时域上不混叠，再使用CZT(Chip-Z Transform)来使最后的信号采样间隔不随距离变化^[11,12]。如需要对方位向进行加窗的情况下，也可以用同样的方法使信号都位于基带，然后在进行方位匹配的同时完成加窗，最后用CZT来保证采样间隔不随距离而变化。

3.3 后处理部分

后处理部分主要用于对有效数据的抽取和对数据进行最后的方位聚焦。后处理部分的时频图如图6所示。其中，截取的时长为PRF对应的时间宽度，可以表示为

$$T'_B = PRF / K_c \quad (7)$$

经过CS算法处理后，每个目标的调频率都变成了 K_{scl} ，所以方位匹配函数可以表示为

$$H_5 = \exp\{-j\pi K_{scl} \eta^2\} \quad (8)$$

最后，再经过一步FFT，数据就聚焦了。处理后的方位采样间隔为

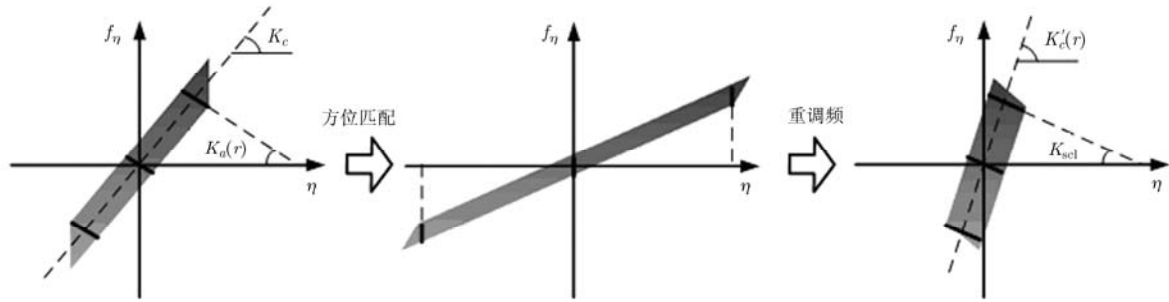


图 5 CS 算法示意图

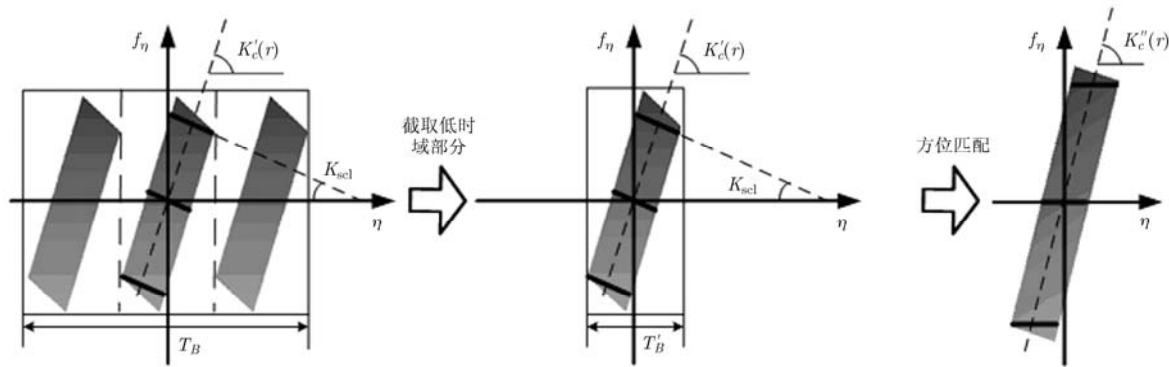


图 6 后处理示意图

$$\Delta\eta = \Delta f_\eta / K_{scl} \quad (9)$$

如果只需要 SAR 图像, 则可以不进行最后的相位补偿, 如果后续处理(如 InSAR 处理)需要用到相位信息, 则需要进行相位补偿。相位补偿函数为

$$H_6 = \exp\{-j\pi K_{scl}\eta^2\} \quad (10)$$

经过相位补偿, 图像有效地在数据范围内聚焦, 并且目标中心的相位与常规成像算法的相位相同, 因此不会影响后续处理^[13]。

4 仿真验证

为验证本文的算法, 本文用一组与 TerraSAR-X 近似的参数^[3]分别用点阵目标和分布目标进行了仿真, 仿真中用到的参数如表 1 所示。各波位的参数如表 2 所示。

4.1 点阵目标仿真

点阵目标仿真采用测绘带 1 的参数, 场景为 3

表 1 卫星平台参数

卫星高度	514 km
卫星速度	7.608 km/s
中心频率	9.65 GHz
天线长度	4.8 m

表 2 各波位参数

	S1	S2	S3	S4
PRF(Hz)	4096	3716	4096	3742
中心视角(°)	35.30	37.13	38.85	40.48
中心斜距(km)	643.1	660.4	678.3	696.9
信号处理角(°)	0.32	0.28	0.32	0.28
扫描速率(°/s)	3.7838	3.1482	3.5879	2.9834
脉冲串时长(s)	0.2490	0.2758	0.2526	0.2801
中心方位分辨率(m)	16	16	16	16
单脉冲串测绘长度(km)	8.72	8.71	8.71	8.71
重叠率(%)	10	10	10	10
扫描周期(s)		1.1268		
测绘带宽(km)		111.03		

×3 的点阵目标, 方位向两端点距中心±4.2 km, 距离向两端点距中心±15 km, 经处理后, 分别取方位向和距离向边缘的两个点和中心点的 2 维等高线图如图 7 所示。

各点目标的成像结果统计如表 3 所示。

点阵目标的处理结果说明, 本文算法可以较好地处理 TOPSAR 数据, 验证了本文算法的有效性。

4.2 分布目标仿真

本文用 TerraSAR-X 在印度维沙卡帕特南港地

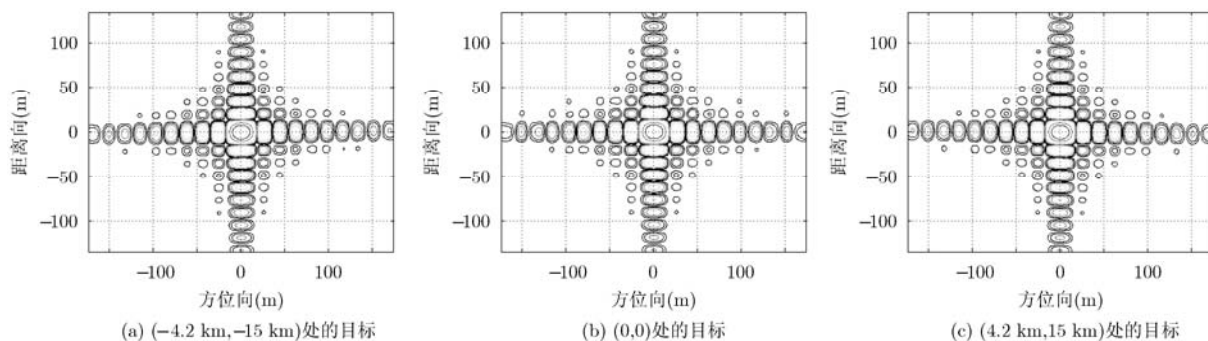


图7 点目标处理结果的2维等高线图

表3 处理结果统计

目标偏移 (方位, 地距)	方位向				距离向(地距)			
	理论分辨率 (m)	分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)	理论分辨率 (m)	分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
(-4.2 km, -15 km)	15.81	15.77	-13.20	-9.86	12.24	12.24	-13.25	-9.83
(0,0)	16.00	16.00	-13.26	-9.83	12.24	12.24	-13.24	-9.80
(4.2 km, 15 km)	16.16	16.19	-13.18	-9.84	12.24	12.24	-13.20	-9.85

区的 SAR 图像作为输入, 场景大小为 25 km×100 km(方位向×距离向), 场景采样间隔为 10 m×10 m(方位向×距离向), 每个子带仿真了 2 个脉冲串, 使用本文算法进行处理拼接后结果如图 8 所示。

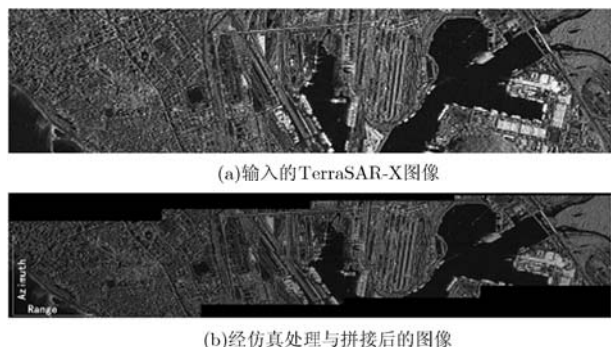


图8 分布目标仿真的输入与输出图像

输出图像在斜距网格上进行拼接, 从拼接结果可以看出, 各子带结果可以完整地拼接, 证明了本文算法的有效性。

4.3 处理速度对比

为验证算法的效率, 本文对比了几种典型全孔径算法的处理速度, 算法 1 为文献[1]中的成像算法, 算法 2 为文献[7]中的成像算法。按照文献[13]的计算方法, 3 种算法对一个测绘带单脉冲串数据计算量和处理速度的统计如表 4 所示。

通过对比, 本文算法比已有全孔径算法提速 25%以上, 说明本文算法通过对算法优化, 在已有算法的基础上使效率得到了进一步的提升。

表4 处理速度统计

	算法 1	算法 2	本文算法
计算量(GFLOP)	7.10	5.27	2.94
实际处理时间(s)	25.72	10.85	8.08
提速(%)	68.6	25.5	-

5 结论

本文通过分析 TOPSAR 信号在频域和时域都有混叠的特点, 提出了一种新的 TOPSAR 成像处理算法, 该算法用频域扩展的预处理步骤来解决信号在频域混叠的问题, 并运用 SPECAN 技术来解决信号在时域混叠的问题, 通过对算法的深入分析与优化, 本文算法步骤紧凑, 计算效率高。点阵目标和分布目标的仿真仿真结果说明了算法的有效性。通过与现有算法对比可以看出, 提出的算法能够保证成像质量, 同时算法效率可以提高 25%以上, 是一种实用高效的 TOPSAR 成像算法。

参考文献

[1] De Zan F and Guarnieri A. M TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(9): 2352-2360.

[2] 明峰, 洪峻, 吴一戎. ScanSAR 的Scalloping 辐射误差研究[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(10): 1806-1808.

Ming Feng, Hong Jun, and Wu Yi-rong. Study on scalloping radiometric error in ScanSAR[J]. *Journal of Electronics &*

- Information Technology*, 2006, 28(10): 1806-1808.
- [3] Meta A, Mittermayer J, Prats P, *et al.* TOPS imaging with TerraSAR-X: mode design and performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 759-769.
- [4] 朱岱寅, 朱兆达. 方位扫描SAR区域成像研究[J]. *航空学报*, 2005, 26(2): 208-213.
Zhu Dai-yin and Zhu Zhao-da. Study on patch mapping by azimuth scan SAR[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2005, 26(2): 208-213.
- [5] Bai Xia, Sun Jin-ping, Hong Wen, *et al.* On the TOPS mode spaceborne SAR[J]. *Science China (Information Sciences)*, 2010, 40(2): 468-480.
- [6] 徐伟, 邓云凯. 基于方位向预处理和后处理的TOPSAR成像方法[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(4): 798-804.
Xu Wei and Deng Yun-kai. An imaging approach for TOPSAR data based on azimuth pre-processing and post-processing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(4): 798-804.
- [7] 徐伟, 邓云凯. 星载TOPSAR方位变标成像算法[J]. *电子学报*, 2011, 39(4): 913-918.
Xu Wei and Deng Yun-kai. Processing of spaceborne TOPSAR data using azimuth scaling[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(4): 913-918.
- [8] 杨威, 李春升, 陈杰, 等. SAR渐进扫描模式波位线性设计方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(10): 2198-2202.
Yang Wei, Li Chun-sheng, Chen Jie, *et al.* TOPSAR beam position design method based on linear flow[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(10): 2198-2202.
- [9] Prats P, Scheiber R, Mittermayer J, *et al.* Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 770-780.
- [10] Meta A, Mittermayer J, and Scheiber R. Extended chirp scaling algorithm for air- and spaceborne SAR data processing in stripmap and ScanSAR imaging modes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(5): 1123-1136.
- [11] Rabiner L, Schafer R, and Rader C. The chirp z-transform algorithm[J]. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 1969, 17(2): 86-92.
- [12] Lanari R, Hensley S, and Rosen P A. Chirp z-transform based SPECAN approach for phase-preserving ScanSAR image generation[J]. *IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation*, 1998, 145(5): 254-261.
- [13] Cumming I G and Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data[M]. Boston, London, Artech House, 2005, Section 5 in Chapter 11.
- 陈 祺: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为星载 SAR 系统及信号处理.
- 黄海风: 男, 1976年生, 副研究员, 研究方向为干涉 SAR、星载分布式 SAR 系统理论等.
- 何 峰: 男, 1976年生, 副研究员, 研究方向为新体制 SAR 系统与信号处理.
- 梁甸农: 男, 1936年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为 SAR 系统与信号处理.