

基于扩展方位 NLCS 的斜视 TOPSAR 成像算法

江 淮^① 赵惠昌^{*①} 汉 敏^② 张淑宁^①

^①(南京理工大学电光学院 南京 210094)

^②(东南大学微波与毫米波重点实验室 南京 210094)

摘 要: 斜视 TOPSAR(Terrain Observation by Progressive scans SAR)成像模式中, 场景内各点目标多普勒中心频率的差异导致方位向信号欠采样并加剧频谱的耦合。针对 TOPSAR 的回波特点, 该文提出一种新的 TOPSAR 全孔径成像算法: 首先引入高阶视向速度补偿消除回波信号的频域模糊; 接着用非线性变标法对方位空变性进行补偿; 最后用 2 维线性变标算法校正高阶视向速度补偿产生的几何形变问题。与传统算法相比, 该文算法可在扩展较少数据量的情况下避免插值运算, 提高成像效率。仿真结果证明了算法的正确性和有效性。

关键词: 斜视 TOPSAR; 非线性变标; CS 变标; 图像几何形变

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)07-1606-06

DOI: 10.11999/JEIT160933

A Squint TOPSAR Imaging Algorithm Based on Extend Azimuth Non-linear Chirp Scaling

JIANG Huai^① ZHAO Huichang^① HAN Min^② ZHANG Shuning^①

^①(School of Electronic & Optical, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

^②(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210094, China)

Abstract: In the squint Terrain Observation by Progressive scans (TOPSAR) mode, the different azimuth scatters have different Doppler center frequencies, which causes azimuth under-sampling problem and increase the coupling between range and azimuth. Considering at the characteristics of squint TOPSAR echo, this article proposes a new full aperture imaging algorithm: first, the azimuth signal aliasing is removed by introducing the nonlinear walk correction; second, the nonlinear chirp scaling algorithm for azimuth focusing is applied to compensating the Doppler modulation rate; finally, the image geometric distortion is eliminated by 2-D chirp scaling operation. Compared with the traditional algorithm, the proposed algorithm avoids the interpolation under the case of extending a small amount of data, hence the calculation needed is less. The simulation results prove the effectiveness of the algorithm.

Key words: Squint TOPSAR; Non-linear chirp scaling; Chirp scaling; Image geometric distortion

1 引言

TOPSAR 既有宽测绘的能力, 又克服了 ScanSAR 的扇贝效应^[1-4], 具有广阔的运用前景。若将斜视和 TOP 模式相结合, 使雷达获得对斜前方大范围区域进行成像的能力, 将提高它在导航制导和侦查测绘的灵活性, 扩展其工程应用范围^[3-5]。但由于斜视 TOPSAR 波束在成像时做周期性扫描, 导致场景目标多普勒中心频率空变并使方位向信号欠采样; 若仍以线性走动校正和方位 NLCS(Non-Linear Chirp Scaling)的传统斜视成像算法^[6,7]来处

理数据, 则需要对回波数据进行升采样并补全时域信号至全孔径, 将大量扩展回波数据量并导致极低运算效率^[8-11]; 故在斜视 TOPSAR 成像算法方面, 基于频域插值的改进波数域算法^[12,13]将更为高效。然而, 改进波数域成像算法是在时域模糊^[14]的情况下进行的, 不便于进一步的运动补偿; 同时在成像处理中引入了插值运算^[15]和多次时频互换, 过程繁琐复杂。

针对这些算法的不足, 本文提出一种斜视 TOPSAR 成像新算法: 首先通过非线性走动去除频域模糊; 接着用 NLCS 算法^[6,7]补偿方位空变; 最后用 2 维线性变标 CS(Chirp Scaling)算法补偿非线性走动校正产生的几何形变。仿真数据验证了算法的正确性和有效性。

收稿日期: 2016-09-19; 改回日期: 2016-11-10; 网络出版: 2016-12-13

*通信作者: 赵惠昌 zhaohch353@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61301216)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61301216)

2 斜视 TOPSAR 回波模型

单个子测绘带斜视 TOPSAR 成像模型^[15]如图 1 所示：雷达以速度 V 进行匀速直线运动，同时波束以 V_θ 的扫描速度对成像区域进行扫描，且在扫描周期的中心时刻的瞬时斜视角为 θ_{ref} ；以 t_a 表示慢时间， t_r 表示快时间；以 f_c 表示发射信号的载波， λ 表示载波波长； A_r 、 A_a 分别为快时间和慢时间的窗函数； R_b 表示目标至雷达的零多普勒距离(最短距离)； c 表示光速； X_n 表示目标的方位向位置。则回波信号经过距离向 FFT 和匹配后可写为式(1)，斜距可写为式(2)：

$$S(t_a, f_r) = A_r A_a \exp(-j\pi 4(f_c + f_r)R(t_a, R_b)/c) \quad (1)$$

$$R(t_a, R_b) = \sqrt{R_b^2 + (Vt_a - X_n)^2} \quad (2)$$

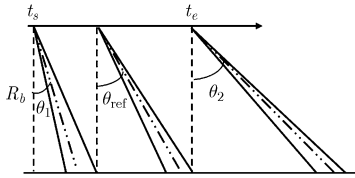


图 1 TOPSAR 成像几何

3 斜视 TOPSAR 成像算法

基于扩展方位 NLCS 的斜视 TOPSAR 成像算法流程图如图 2 所示。整体算法包括 3 部分，下面分别对各部分进行介绍。

3.1 信号预处理

图 3(a)给出了斜视 TOPSAR 模式下不同方位向目标回波的时频关系图，其中 B_i 为单个目标的瞬时多普勒带宽，PRF 为脉冲重复频率， B_a 为方位信号带宽，两条斜虚线中间区域的粗实线为各目标方位信号时频分布。由图 3(a)知，斜视 TOPSAR 回波多普勒中心频率变化剧烈，方位向信号带宽要大于 PRF 采样，回波信号在频域模糊^[10]。而由图 1 知，斜视 TOPSAR 中平台飞行长度小于成像场景长度，造成成像后的图像长度将大于回波录取时间长度；为避免在时域过多补零，图 3(b)中选择近似多普勒中心时刻 t_x 为聚焦时刻。将瞬时斜视角正切函数一阶泰勒展开并对相应正弦函数作泰勒三阶近似，则各参数的关系为

$$\left. \begin{aligned} \tan(\theta_{\text{ref}} + V_\theta t_a) &\approx \tan \theta_{\text{ref}} + \gamma t_a \\ \sin \theta_x &= \sin(\arctan(\tan \theta_{\text{ref}} + \gamma t_x)) \\ &\approx \sin \theta_{\text{ref}} + z_1 t_x + z_2 t_x^2 + z_3 t_x^3 \\ t_x &= (X_n - R_b \tan \theta_{\text{ref}})/(V + R_b \gamma) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

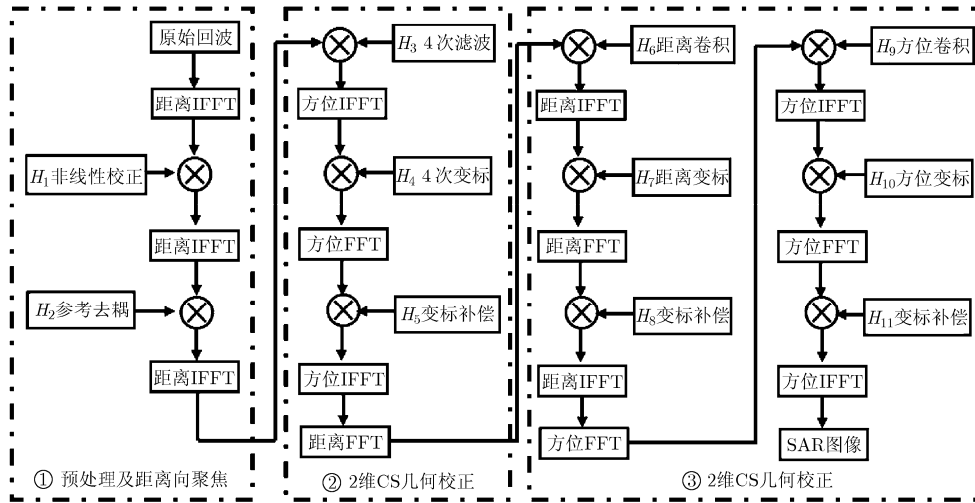
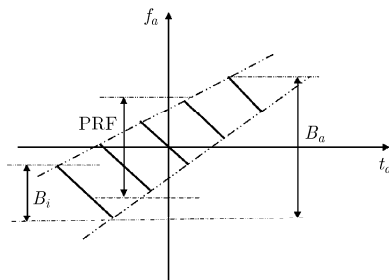
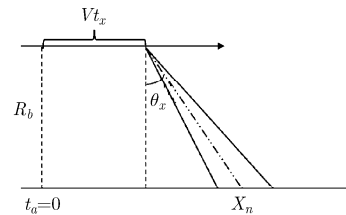


图 2 斜视 TOPSAR 算法流程图



(a) 方位信号时频图



(b) 聚焦时刻几何关系

图 3 斜视 TOPSAR 信号分析

将斜距式在近似多普勒中心时刻 t_x 重新展开:

$$R(R_b, X_n) \approx \frac{R_b}{\cos \theta_x} - V \sin \theta_x (t_a - t_x) + \frac{\cos^3 \theta_x}{2R_b} V^2 (t_a - t_x)^2 + \dots \quad (4)$$

式中, 一次项 $V \sin \theta_x$ 为 t_x 时刻的雷达视向速度, 体现了多普勒中心频率的空变性。可利用 $V \sin \theta_x$ 的积分构造非线性距离校正函数补偿:

$$H_1 = \exp(-j\pi(f_c + f_r) \cdot V (\sin \theta_{\text{ref}} t_a + 12z_1 t_a^2 + 8z_2 t_a^3 + 6z_3 t_a^4) / (6c)) \quad (5)$$

经 H_1 补偿后的回波可写成:

$$S_2(t_a, f_r) = A_r A_a \exp \left[-j\pi \frac{(f_c + f_r)}{c} (4R_x + 4e_2(t_a - t_x)^2 + 4e_3(t_a - t_x)^3 + z_4(t_a - t_x)^4) \right] \quad (6a)$$

$$\left. \begin{aligned} R_x &= \frac{R_b}{\cos \theta_x} + V \left(\sin \theta_{\text{ref}} t_x + \frac{1}{2} z_1 t_x^2 + \frac{1}{3} z_2 t_x^3 + \frac{1}{4} z_3 t_x^4 \right) \\ e_2 &= \frac{\cos^3 \theta_x}{2R_b} V^2 + \frac{1}{2} z_1 + z_2 t_x + \frac{3}{2} z_3 t_x^2 \\ e_3 &= \frac{\sin \theta_x \cos^4 \theta_x}{2R_b^2} V^3 + \frac{1}{3} z_2 + z_3 t_x \end{aligned} \right\} \quad (6b)$$

式(6b)中, R_x 为目标经过非线性走动校正后的距离向聚焦位置。

对式(6a)进行方位 FFT 后, 利用场景中心参考点构造 2 维去耦函数进行统一近似去耦补偿^[7], 同时作距离向 IFFT, 即完成距离向信号处理。

3.2 方位 NLCS 聚焦

由式(6)可知, 经过非线性距离走动函数处理后, 方位向平移不变的性质不再成立。为补偿方位空变性, 如式(7)所示将调频项 e_2, e_3 进行泰勒展开近似:

$$\left. \begin{aligned} 4e_2(R_b, t_x) / \lambda &\approx e_{20} + e_{21} t_x + e_{22} t_x^2 \\ 4e_3(R_b, t_x) / \lambda &\approx e_{30} + e_{31} t_x \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

为给后续的非线性变标操作提供足够的系数, 同时补偿 3 次空变相位, NLCS 首先对回波进行 4 次滤波, 并在方位 IFFT 后引入 4 次变标函数:

$$H_3 = \exp \left[-j\pi \left(\frac{e_{30}}{e_{20}} + Y_3 \right) f_a^3 - j\pi \left(\frac{4e_{20}e_{30} - 9e_{30}^2}{4e_{20}^5} + Y_4 \right) f_a^4 \right] \quad (8)$$

$$H_4 = \exp(-j\pi q_2 t_a^2 - j\pi q_3 t_a^3 - j\pi q_4 t_a^4) \quad (9)$$

将经过 4 次变标函数处理的时域回波作方位 FFT, 整理各项可得

$$S_5(f_a, t_r) = \text{sinc}(t_r - 2R_x/c) \exp(-jA f_a t_x - jB f_a t_x^2 - jC f_a^2 t_x - jD f_a^2 t_x^2 - jE f_a^3 t_x + jF f_a^2 + jG f_a^3 \dots) \quad (10)$$

为消除方位向空变性, 可令式(10)中对应项为特定系数^[6], 即

$$\left. \begin{aligned} A &= 2\alpha\pi \\ B &= C = D = E = 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中, α 为变标因子。求解式(11)可得以上未知量的解为^[7]

$$\left. \begin{aligned} q_2 &= -e_{20}(\alpha - 1)/\alpha, \quad q_3 = e_{21}q_2/(3e_{20}) \\ e_{3x} &= (e_{20}e_{31} - 3e_{21}e_{30})/e_{20}^4 \\ Y_3 &= (e_{20}e_{21} + 2e_{21}q_2)/(3e_{20}^3q_2) \\ q_4 &= (3e_{3x}q_2e_{20}^4 - 2e_{22}e_{20}^2)/(12e_{20}^2) \\ Y_4 &= (-3e_{3x}e_{20}^4 - 6e_{3x}q_2e_{20}^3 + 2e_{22}e_{20})/(12e_{20}^4q_2) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

最后在频域补偿对应的一致调频项:

$$H_5 = \exp \left[-j\pi \frac{1}{e_{20} + q_2} f_a^2 - j\pi \frac{Y_3 e_{20}^3 + q_3}{(e_{20} + q_2)^3} f_a^3 \right] \quad (13)$$

补偿式(13)后对回波作方位向 IFFT, 此时 2 维聚焦的回波可写为

$$S_6(t_a, t_r) = \text{sinc}(t_r - 2R_x/c) \text{sinc}(t_a - \alpha t_x) \quad (14)$$

3.3 几何校正

由式(3), 式(6b)可知, 距离向聚焦位置与 t_x 有关; 可用 CS 变标算法将式(14)距离压缩项中 $\cos \theta_x$ 扰动成 $\cos \theta_{\text{ref}}$ 来消除形变; 由 CS 算法原理可知对应的距离向卷积函数、变标因子、变标函数及频域补偿函数为

$$\left. \begin{aligned} H_6 &= \exp(-j\pi f_r^2 / K_r) \exp(4j\pi R_{\text{ref}} f_r / c \cos \theta_x) \\ &\quad \cdot \exp \left(j\pi f_r V \left(24 \sin \theta_{\text{ref}} t_x + 12z_1 t_x^2 + 8z_2 t_x^3 + 6z_3 t_x^4 \right) / 6c \right) \\ \beta &= \cos \theta_{\text{ref}} / \cos \theta_x, \quad H_7 = \exp(j\pi(\beta - 1)K_r t_r^2) \\ H_8 &= \exp(j\pi f_r^2 / (\beta K_r)) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

注意式(15)中卷积函数 H_6 会改变方位向信号带宽, 增加的带宽 B_{acs} 可估算为

$$\left. \begin{aligned} H_6 &\approx \exp(2j\pi(d_0 + d_1 t_a + d_2 t_a^2) f_r) \\ B_{\text{acs}} &\approx 2 \max(f_r)(d_1 + 2d_2 T) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

方位带宽增加后超出 PRF 时, 则需要对方位向进行升采样处理。为将式(6b)方位向中的 $V + R_b \gamma$ 用

CS 算法扰动成 $V + R_{\text{ref}}\gamma$ ，同理可知对应方位向卷积函数、变标因子、变标函数及对应的方位频域变标补偿函数为

$$\left. \begin{aligned} H_9 &= \exp(-j\pi f_a^2/K_a) \\ g &= (V + R_{\text{ref}}\gamma)/(V + R_b\gamma) \\ H_{10} &= \exp(j\pi(g-1)K_a t_a^2) \\ H_{11} &= \exp(j\pi f_a^2/(gK_a)) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

完成方位向形变校正后；可根据具体实际应用需求作进一步的几何校正。

4 算法仿真与验证

下面对算法进行仿真验证。仿真成像场景如图 4 所示，仿真雷达参数如表 1 所示，则回波方位向信号带宽 B_d 及全孔径时宽 T_t 可估算为

$$\left. \begin{aligned} B_d &= 2V(\sin 50^\circ - \sin 40^\circ)/\lambda \approx 5752 \text{ Hz} \\ T_t &= (R_{\text{ref}} \tan 50^\circ - R_{\text{ref}} \tan 40^\circ + V)/V \approx 9.8 \text{ s} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

由表 1 知， B_d 是 PRF 采样的 3.8 倍， T_t 是成像时间的 7 倍，时频模糊严重。由式(16)知，使用本文算法时，只需在距离 CS 形变校正时进行 2 倍方位向升采样就可保证时频不模糊，避免了传统算法^[6,7,15]的海量数据拓展；经本文算法的场景成像结果如图 5 所示。

为说明调频率二阶空变补偿的性能优势，图 6

表 1 仿真雷达参数

载波频率	35 GHz	斜视角	40° – 50°
波束扫描速度	10°/s	天线孔径	0.5 m
雷达平台速度	200 m/s	脉冲重复频率	1200 Hz
发射信号带宽	150 MHz	脉冲持续时间	2.5 μs
场景中心距离	5000 m	成像时间	1.4 s

给出了文献[15]算法成像的各点方位向剖面，图 7，图 8 给出了采用本文算法得到的方位向剖面及等高线。可见相比一阶近似，二阶调频近似的成像效果更趋于理想。由于点 1 至点 3 多普勒中心时刻的成像斜视角逐渐递增，方位向分辨率相应降低，成像“十字瓣”也出现了不同程度的扭曲。这些现象均体现了斜视 TOPSAR 模式的成像特点。

5 结束语

针对 TOPSAR 回波特点，本文首先通过非线性走动校正去除回波频域模糊；随后在方位 NLCS 聚焦的基础上利用 2 维 CS 算法进行几何校正并成像。和现有的斜视 TOPSAR 成像算法相比，新算法仅包含 FFT 和乘法运算，且可在拓展较少数据量的情况下进行成像，有高效和易于实现的优点，对斜视 TOPSAR 算法的研究与实现有一定理论意义和工程应用价值。

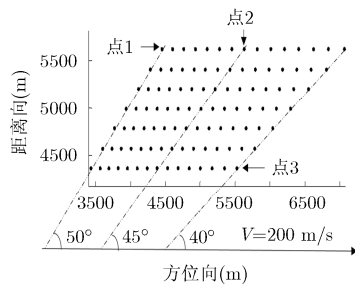


图 4 仿真成像场景

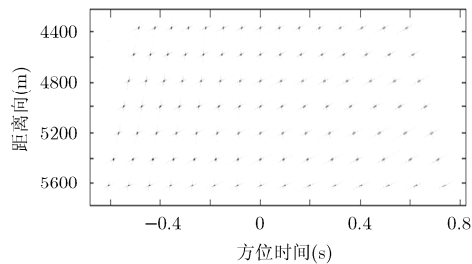
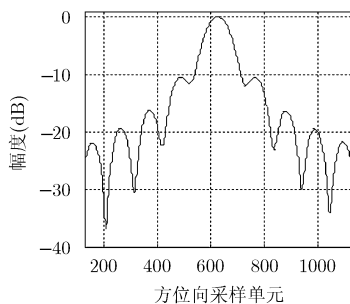
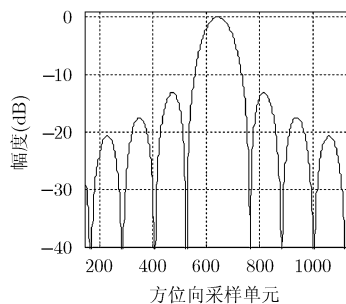


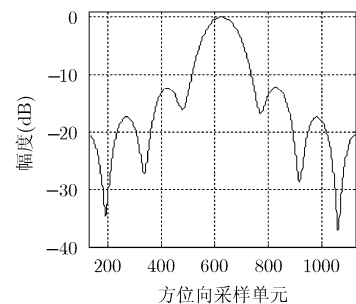
图 5 场景成像图



(a)点1



(b)点2



(c)点3

图 6 一阶近似成像方位向剖面

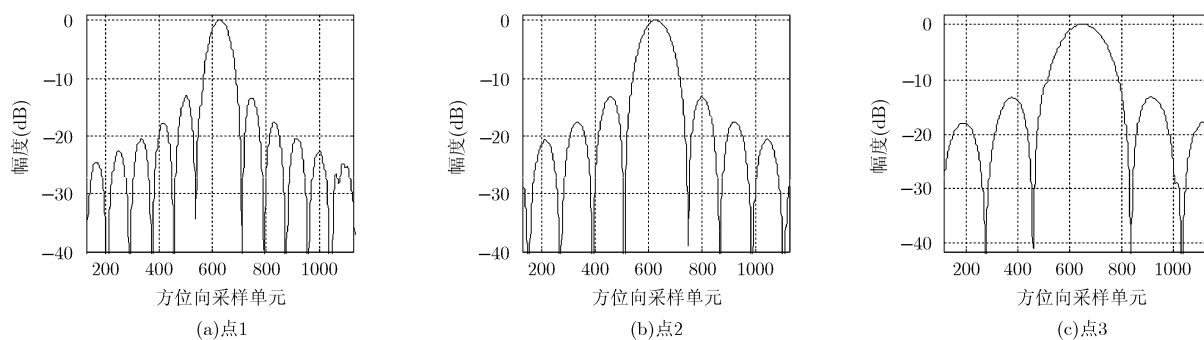


图7 二阶近似成像方位向剖面

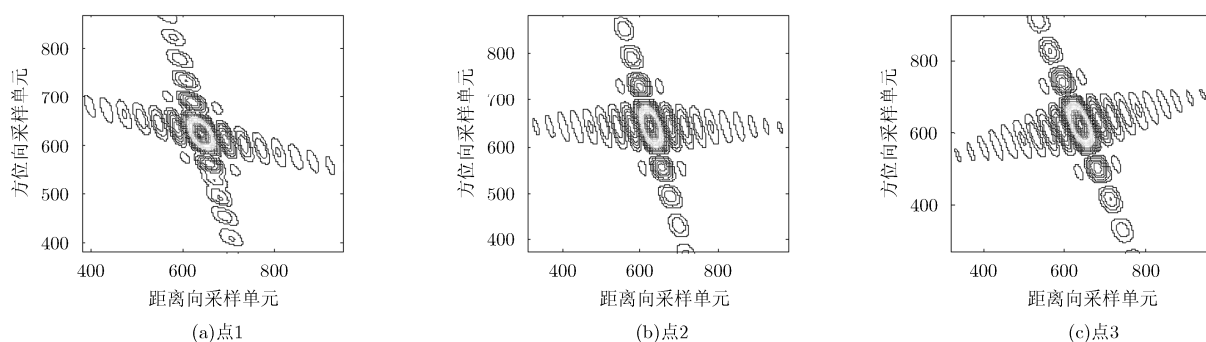


图8 二阶近似成像插值等高线

参考文献

- [1] 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.
- [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 Yirong. Study on scalloping radiometric error in Scan-SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(10): 1806-1808.
- [3] WANG Yan, LI Jingwen, CHEN Jie, et al. A parameter adjusting polar format algorithm for extremely high squint SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 640-650. doi: 10.1109/TGRS.2013.2243156.
- [4] 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.
- [5] SUN Guangcai, JIANG Xiuwei, XING Mengdao, et al. Focus improvement of high-squinted data based on azimuth nonlinear scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(6): 2308-2322. doi: 10.1109/TGRS.2010.2102040.
- [6] AN Daoxiang, HUANG Xiaotao, JIN Tian, et al. Extended nonlinear chirp scaling algorithm for high-resolution highly squint SAR data focusing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(9): 3595-3609. doi: 10.1109/TGRS.2012.2183606.
- [7] 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. doi: 10.1109/TGRS.2009.2026743.
- [8] 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 Remote Sensing*, 2010, 48(2): 770-780. doi: 10.1109/TGRS.2009.2027701.
- [9] 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. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00668.
XU Wei and DENG Yunkai. An imaging approach for TOPSAR data based on azimuth preprocessing and processing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(4): 798-804. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00668.
- [10] CHEN Qi, HUANG Haifeng, et al. Using TOPSAR for district observation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(2): 406-410. doi: 10.1109/LGRS.2012.2207086.

- [11] YANG Jun, SUN Guangcai, and XING Mengdao. Squinted TOPS SAR imaging ba-sed on modified range migration algorithm and spectral analysis[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(10): 1707-1711. doi: 10.1109/LGRS.2014.2306433.
- [12] 怀园园, 梁毅, 李震宇, 等. 一种基于方位谱重采样的大斜视子孔径SAR 成像改进Omega-K算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(7): 1744-1750. doi: 10.11999/JEI-T141383.
- HUAI Yuanyuan, LIANG Yi, LI Zhenyu, *et al.* Modified ω -K algorithm for subaperture squint SAR imaging based on azimuth resampling[J]. *Journal of Electronics & Information Technology Electronics*, 2015, 37(7): 1744-1750. doi: 10.11999/JEIT141383.
- [13] 陈祺, 黄海风, 何峰, 等. 基于频域扩展和SPECAN的全孔径TOPSAR成像算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(10): 2246-2250. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00366.
- CHEN Qi, HUANG Haifeng, HE Feng *et al.* Full aperture imagining algorithm of TOPSAR based on frequency domain extension and SPECAN[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(10): 2246-2250. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00366.
- [14] 杨军, 李震宇, 孙光才, 等. 一种新的大斜视TOPSSAR全孔径成像方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2015, 42(1): 47-51. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2015.01.007.
- YANG Jun, LI Zhenyu, SUN Guangcai, *et al.* Novel full aperture imaging algorithm for highly squinted TOPSSAR[J]. *Journal of Xidian University*, 2015, 42(1): 47-51. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2015.01.007.
- [15] 杨军, 吴玉峰, 孙光才, 等. 基于方位FNCS的斜视TOPSSAR成像方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(11): 2237-2243. doi: 10.3969/j.issn.1001-560X.2012.11.09.
- YANG Jun, WU Yufeng, SUN Guangcai, *et al.* Squint TOPSSAR imaging method based on azimuth FNCS[J]. *Systems Engineering and Electronic*, 2012, 34(11): 2237-2243. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.11.09.
- 江 淮: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像处理.
- 赵惠昌: 男, 1958 年生, 教授, 博士, 研究方向为引信信号处理、SAR 成像处理、电子对抗技术等.
- 汉 敏: 女, 1989 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像处理、DOA 估计等.
- 张淑宁: 女, 1977 年生, 副教授, 博士, 研究方向为引信信号处理、分形理论等.