

高分宽幅SAR系统下的方位多通道运动目标成像算法研究

王玉莹^{*①②} 张志敏^① 李宁^③ 范怀涛^① 赵庆超^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100049)

^③(河南大学计算机与信息工程学院 开封 475004)

摘要: 在方位多通道SAR系统中, 由于运动目标的回波特性和静止目标的不同, 传统的重构滤波器组方法对运动目标的重建是无效的。该文提出一种方位多通道SAR运动目标信号重构方法。该方法首先分析了方位多通道SAR系统中运动目标回波特性, 并与静止目标回波形式进行对比, 给出了传统重构方法失效的主要原因; 通过引入运动目标的径向速度参数, 有效实现了匀速运动目标的频谱重构, 较好地抑制了方位多通道SAR系统中匀速运动目标的方位模糊。星载仿真实验结果验证了该重构方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 高分宽幅; 方位多通道; 运动目标重构

中图分类号: TN951; TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)03-0541-06

DOI: 10.11999/JEIT190211

A Moving Target Imaging Approach for the Multichannel in Azimuth High Resolution Wide Swath SAR System

WANG Yuying^{①②} ZHANG Zhimin^① LI Ning^③

FAN Huaitao^① ZHAO Qingchao^{①②}

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

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

^③(School of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: Since the echo characteristics of moving targets are different from that of stationary targets, the traditional reconstruction filter bank algorithm, i.e., the reconstruction filter algorithm, is not applicable. In this paper, a novel reconstruction approach of the moving target for a multichannel in azimuth High-Resolution Wide-Swath (HRWS) Synthetic Aperture Radar (SAR) system is proposed. The approach firstly analyzes the echo characteristics of the moving target for the multi-channel in azimuth SAR system and gives the main reason for the failure of the traditional reconstruction method in contrast to the form of the stationary target echo. By introducing the radial velocity of the moving target, the spectrum reconstruction of the uniform moving target is effectively realized, and the azimuth ambiguities of the uniform moving target for the multi-channel in azimuth SAR system is well suppressed. Space-borne simulated results confirm the effectiveness of the proposed reconstruction approach.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); High-Resolution Wide-Swath (HRWS); Multichannel in azimuth; Moving target reconstruction

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)能提供高分辨率、全天时全天候对地观测的

图像^[1]。然而, 传统的单通道SAR系统由于最小天线面积的限制, 不能同时实现高分辨率和宽测绘带成像^[2]。为了克服单通道SAR系统的限制, 高分辨率宽幅(High-Resolution Wide-Swath, HRWS)成像的概念被提出了^[2,3], 其中应用的方位多通道技术通过将方位向天线分成多个接收子孔径的方式, 利用额外的空间采样弥补了时间采样的不足。然而, 由于SAR系统脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)的选取不是任意的, 通过方位多

收稿日期: 2019-04-03; 改回日期: 2019-06-14; 网络出版: 2019-08-23

*通信作者: 王玉莹 chaoqiwyychaoluo@163.com

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0502700)

Foundation Item: The National Key R&D Program of China (2017YFB0502700)

通道技术获取的多个通道联合信号常常面临着非均匀的问题, 这样的信号经过成像处理后, 图像上会出现方位模糊, 严重损害了图像的质量^[4,5]。

为了抑制方位模糊, 实现非均匀信号的频谱重构, 文献^[6]基于广义采样定理^[7], 提出了一种方位多通道SAR系统频谱重构算法——重构滤波器组算法, 实现了由于非均匀导致混叠的方位频谱的无模糊重构。文献^[8]立足于空时自适应处理的思想, 提出了空域数字波束形成(Digital Beam Forming, DBF)算法, 该算法利用零点指向法(又称为最优波束形成方法)设计得到滤波器实现了非均匀信号的频谱重建。此外, 文献^[9]也提出了一种通过将接收阵元的双通道数据映射为单通道数据的算法来消除方位向信号的模糊。然而, 上述这些方法只适用于静止场景, 当场景中存在运动目标时, 上述这些方法将无法对回波数据进行有效重建。

不同于传统多通道SAR系统中的运动目标回波信号^[10-12], 由于系统的PRF低于多普勒带宽, 所以方位多通道系统下单个通道的回波信号是欠采样的。因此, 传统的运动目标成像算法也无法实现对方位多通道运动目标回波数据的有效处理。

针对方位多通道下的运动目标信号处理问题, 文献^[13]中首次基于波束形成原理, 提出了匹配重构滤波器组(Matched Reconstruction Filter Bank, MRFB)算法, 成功实现了对运动目标的频谱重建。在频谱重建和成像过程中, 运动目标的速度估计是至关重要的。针对这一问题, 文献^[14]中提出了一种基于投影子空间的方位多通道系统运动目标径向速度估计算法, 该方法先选定一个径向速度, 然后利用噪声子空间来评估相位误差, 进而判断最初选取的径向速度是否为目标的真实速度。在此基础上, 本文基于传统的重构滤波器组算法, 通过详细分析目标运动对于重构的具体影响以及对比运动目标距离徙动曲线的特性, 提出了一种方位多通道下的运动目标成像算法, 本文的主要贡献在于提出了一种方位多通道下的运动目标的重构方法, 改善了传统重构算法的不足, 并且在保证运动目标的良好重构效果的前提下, 忽略了一些非关键相位对重构的影响, 简化了重构滤波器的计算过程。此外, 在距离徙动曲线特性分析结果的基础上, 结合运动目标的重构方法, 提出了一套完整的方位多通道运动目标的成像流程, 并通过星载仿真实验数据验证了该算法对运动目标的频谱重建和聚焦成像的有效性。

2 方位多通道运动目标信号模型

方位多通道SAR系统运动目标的几何关系如

图1所示。可以看出, 该SAR系统是一个典型的方位3通道系统, 该系统有1个发射子孔径(Tx)和3个接收子孔径(Rx)。当平台以速度 v_s 从 O_a 处运动至 O_b 处时, 目标从 P_a 处运动到了 P_b 处。目标的运动速度被分解为两个方向: 沿航迹的速度 v_x 和垂直航迹的速度 v_y 。

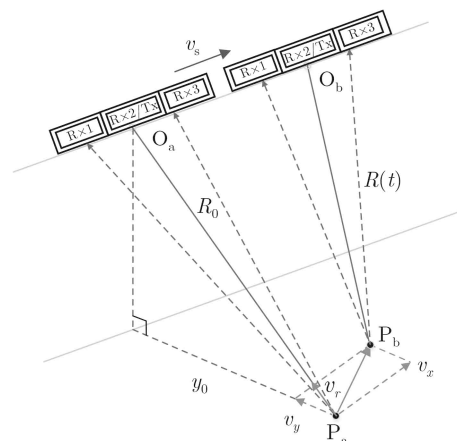


图1 方位多通道SAR运动目标几何关系示意图

经过信号解调和距离压缩并忽略包络后, 方位多通道系统第 j 个通道的运动目标方位向脉冲响应函数(Impulse Response Function, IRF)可以表示为

$$s_j(\tau, t) = \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda}R_j(t, v_r)\right) \quad (1)$$

其中, τ 是距离向时间, t 是方位向时间, v_r 为斜距平面内运动目标的径向速度, $R_j(t, v_r)$ 为第 j 个通道的瞬时斜距, λ 为电磁波波长。第 j 个通道的瞬时斜距方程可以表示为

$$R_j(t, v_r) = \sqrt{(R_0 + v_r t)^2 + v^2 t^2} + \sqrt{(R_0 + v_r t)^2 + (vt - \Delta x_j)^2} \quad (2)$$

其中, R_0 表示平台和目标之间的最近斜距, Δx_j 代表发射子孔径和接收子孔径之间的间隔, $v = v_s - v_x$ 。由于星载SAR系统中的平台飞行速度远远高于目标的方位向速度, 可得 $v \approx v_s$ 。

对式(2)进行泰勒展开并保留到2次项, 可以得到

$$R_j(t, v_r) \approx 2R_0 + 2v_r t + \frac{(v_r t)^2}{R_0} + \frac{\Delta x_j^2}{4R_0} + \frac{v^2}{R_0} \left(t - \frac{\Delta x_j}{2v}\right)^2 \quad (3)$$

其中, $(v_r t)^2/R_0$ 数值的量级为 10^{-3} , 通常可以被忽略。

把式(3)代入式(1)中, 可以得到如下方位多通

道系统中第 j 个通道运动目标的方位向IRF和静止目标的方位向IRF分别为式(4)和式(5)

$$h_{s,j}(t, v_r) = \exp\left(-i \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \cdot R_0\right) \cdot \exp\left(-i \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \cdot v_r t\right) \cdot \exp\left(-i \cdot \frac{\pi \Delta x_j^2}{2\lambda R_0}\right) \cdot \exp\left(-i \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{v^2}{R_0} \left(t - \frac{\Delta x_j}{2v}\right)^2\right) \quad (4)$$

$$h_{s,j}(t) = \exp\left(-i \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \cdot R_0\right) \cdot \exp\left(-i \cdot \frac{\pi \Delta x_j^2}{2\lambda R_0}\right) \cdot \exp\left(-i \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{v_s^2}{R_0} \left(t - \frac{\Delta x_j}{2v_s}\right)^2\right) \quad (5)$$

将式(4)和式(5)进行对比, 可以发现方位多通道系统中运动目标的方位向IRF中多出了一个和目标径向速度 v_r 相关的相位项。即 $\exp(-i \cdot 4\pi/\lambda \cdot v_r t)$ 。该相位项不止和目标径向速度相关, 还和目

$$\mathbf{H}(f, v_r) = \mathbf{H}(f + 2v_r/\lambda) \begin{pmatrix} H_1(f + 2v_r/\lambda) & \dots & H_N(f + 2v_r/\lambda) \\ H_1(f + 2v_r/\lambda + \text{PRF}) & \dots & H_N(f + 2v_r/\lambda + \text{PRF}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_1(f + 2v_r/\lambda + (N-1) \cdot \text{PRF}) & \dots & H_N(f + 2v_r/\lambda + (N-1) \cdot \text{PRF}) \end{pmatrix} \quad (7)$$

由此可得, 运动目标的重构滤波器组为^[6]

$$\mathbf{P}(f, v_r) = \mathbf{H}^{-1}(f, v_r) \quad (8)$$

从式(7)中可以看出, 与静止目标相比, 运动目标最大的不同在于径向速度的引入。通过引入这一项, 改进后的重构滤波器组可以实现运动目标的方位向频谱重构。频谱重构前后的示意图如图2所示。其中, 虚线表示静止目标的重构过程, 实线表示运动目标的重构过程。可以看出, 方位频谱被限

制的方位向时间 t 相关。当把该指数项变换到频域之后会影响预滤波器的表达形式, 进而改变重构滤波器的表达形式。由此可见, 要想有效重建运动目标的方位向频谱, 必须考虑和径向速度相关的相位项对重构的影响。而传统的静止目标重构算法并没有考虑这一点, 因此无法重建运动目标的频谱。

3 方位多通道运动目标成像算法

3.1 运动目标重构算法

基于前面的分析, 要得到运动目标的重构滤波器, 实现频谱的有效重构, 需着重分析和径向速度相关的相位项。

依据式(5), 式(4)可以改写为下式

$$h_{s,j}(t, v_r) = h_{s,j}(t) \cdot \exp\left(-i \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \cdot v_r t\right) \quad (6)$$

经过傅里叶变换之后, 根据时频转换定理, 即时域的相移等价于频域的频移, 可得运动目标方位向IRF的预滤波器表达式为

制在 $[-\text{PRF}, \text{PRF}]$ 范围内, 通过低于多普勒带宽的PRF采样后, 方位频谱发生了混叠。经过改进的重构滤波器组算法重构之后, 方位频谱得以恢复。实现了频谱的有效重建后, 方位多通道信号近似可以看成是均匀采样的单通道SAR信号。接下来, 将讨论成像过程中的一个关键步骤——距离徙动校正(Range Cell Migration Correction, RCMC)。

3.2 距离徙动校正

距离徙动(Range Cell Migration, RCM)是由于在目标照射时间内, 轨迹在距离单元间发生了移位。SAR信号是2维的, 距离向是发射的chirp脉冲信号采样, 方位向可以看成是等效的chirp信号。对于chirp信号而言, 可以采用脉冲压缩的方法进行处理, 而1个2维chirp信号, 如果这两个维度上的chirp信号是相互独立的话, 那么对这两个维度分别进行脉冲压缩处理后, 即可以得到点目标的聚焦成像结果。而实际的SAR系统, 由于目标和平台之间存在相对运动, 使得轨迹在距离单元之间发生了移动, 进而导致距离向和方位向信号发生了耦合, 因此单独的2维脉冲压缩处理, 已经无法得到聚焦良好的点目标。RCM的存在严重降低了成像质量, 同时也使得信号处理过程更加复杂。由此可见, 为了得到良好聚焦的SAR图像, RCMC需要

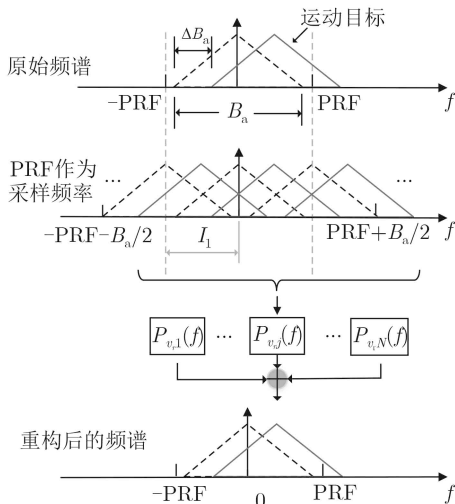


图2 带限信号频谱经采样后的重构结果示意图

消除信号方位向和距离向之间的耦合, 校正由于轨迹在距离单元间的移位导致的弯曲。距离向脉冲压缩之后, 再进行RCMC以及方位向脉冲压缩处理, 即可得到聚焦良好的点目标。

对于传统SAR系统中的运动目标信号而言, RCM依赖于合成孔径时间、距离分辨率和运动参数。运动目标在距离单元内的RCM可以近似表示为

$$\Delta R(t) \approx \frac{v^2}{2R_0} t^2 + v_r t \quad (9)$$

其中, 第1项是静止目标的RCM, 第2项与动目标的径向速度相关, 当考虑静止目标的RCM曲线时, 该项为0。运动目标在频域中总的RCM为

$$\Delta R(f) = \frac{\lambda^2 R_0}{8v^2} \left(f - \frac{2v_r}{\lambda} \right)^2 - \frac{R_0 v_r^2}{2v^2} \quad (10)$$

当 $v_r = 0$ 时, 可以得到静止目标方位频域的RCM曲线为

$$\Delta R(f) = \frac{\lambda^2 R_0}{8v^2} f^2 \quad (11)$$

将运动目标的频域RCM曲线(见式(10))和静止目标的(见式(11))进行对比, 可以看出, 二者中的 f^2 的系数相同, 这意味着运动目标的徙动曲线的弯曲程度与静止目标是一致的, 只是方位频率的取值范围不同。

据此, 运动目标的RCMC可以通过修改原来静止目标徙动曲线的频域范围来实现: 当目标的多普勒带宽为 B_a 时, 静止目标需要校正的方位频率范围为 $[-B_a/2, B_a/2]$, 而此时运动目标需要校正的方位频率范围为 $[-B_a/2 - 2v_r/\lambda, B_a/2 - 2v_r/\lambda]$ 。上述方法适用于多普勒模糊数为0的条件, 即径向速度引起的多普勒频偏不能超过PRF/2。

3.3 成像算法流程

方位多通道SAR运动目标信号处理算法流程图如图3所示。

从图3中可以看出, 该算法是在已知目标径向速度的前提下, 重点研究了方位多通道下的运动目标频谱重构和成像环节。首先, 对 N 个接收通道的回波信号进行距离压缩和方位FFT, 然后将已知的径向速度代入式(7)和式(8)中, 得到重构滤波器组并对运动目标的方位频谱进行重构处理; 接着对重构后的信号进行RCMC和方位向压缩, 经过方位IFFT之后, 即可得到聚焦后的SAR图像。

4 实验结果验证

4.1 频谱重构实验结果

为了验证本文所提出的方位多通道SAR含速度

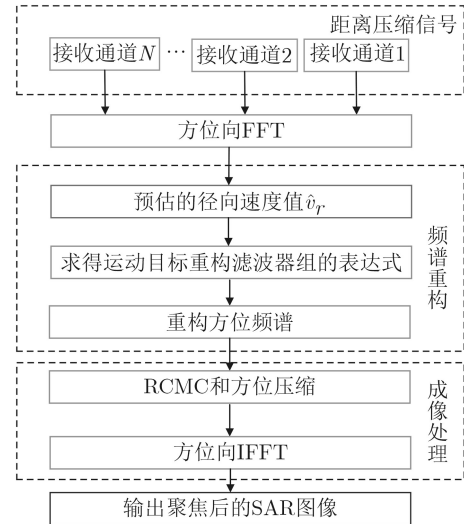


图3 方位多通道运动目标成像算法流程图

目标成像算法的有效性, 本节仿真了一个单一平台方位3通道的星载SAR系统, 场景中心处存在一个运动的点目标。该星载SAR系统的仿真参数如表1所示, 可以看出, PRF是低于多普勒带宽并且偏离理想的PRF, 目标的速度是5 m/s。

表1 方位多通道星载SAR系统仿真参数

参数	取值
场景中心斜距	890 km
卫星速度	7474.8 m/s
多普勒带宽	3737.4 Hz
载频	9.65 GHz
理想PRF	1495 Hz
实际PRF	1600 Hz
目标速度	5 m/s

在这种条件下, 传统重构算法对运动目标回波信号重构前后的结果如图4所示。从图4(a)中可以看出, 重构前, 由于PRF偏离理想采样和目标径向速度的存在, 方位频谱的混叠情况严重。此外, 径向速度的存在也使得方位频谱的多普勒中心发生了偏移。图4(b)显示了经过传统重构算法重构之后的结果, 可以看出方位频谱的混叠现象依然存在, 这意味着对静止场景有效的重构算法, 已经无法重构混叠的运动目标方位向频谱。

运动目标重构算法处理之后的结果如图5所示。从图5(a)中可以看出, 原来图4(a)中严重混叠的方位频谱得到了较好的重建。可以看出, 由于目标径向速度的存在, 多普勒中心偏离了原点。图5(b)显示了重建后归一化的点目标方位信号幅度图, 补偿掉由于目标径向速度的存在导致的频谱偏

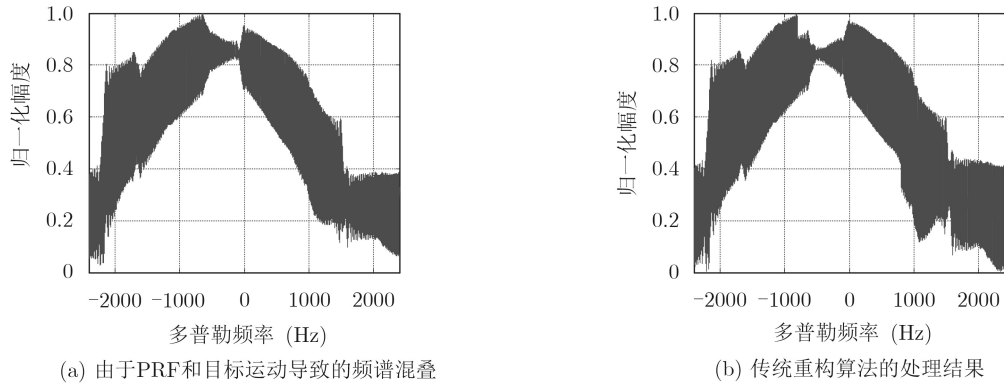


图4 传统重构算法对运动目标回波的重建结果

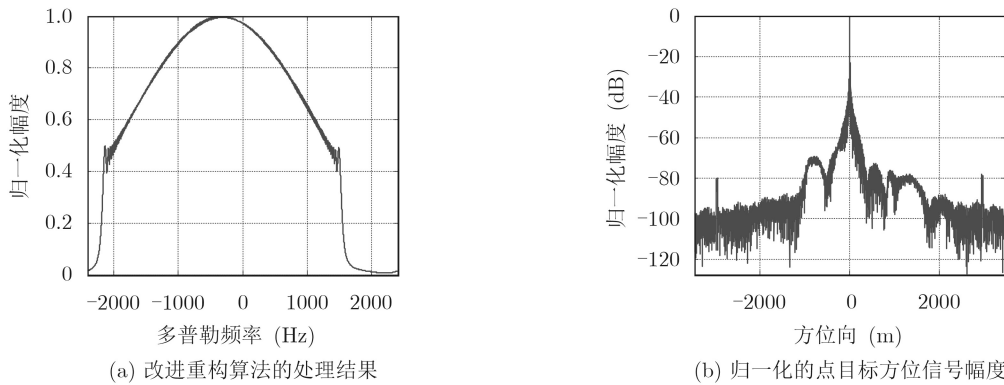


图5 运动目标重构算法对运动目标回波的重建结果

移并经过改进算法重构之后，假目标的最大峰值降到了-70 dB左右。由此可见，方位频谱得到了良好重建的同时，假目标也得到了抑制。本文算法的有效性得以验证。

4.2 成像实验结果

方位频谱经过运动目标重构算法重构之后，非

均匀导致的方位模糊得以消除。而后经过距离压缩、RCMC以及方位压缩后，可以得到成像后运动目标的等高线图，如图6(a)所示。图6(b)显示了聚焦成像后，点目标的方位向峰值旁瓣比为-19.34 dB，在可接受范围之内。由此，本文算法的有效性得到了验证。

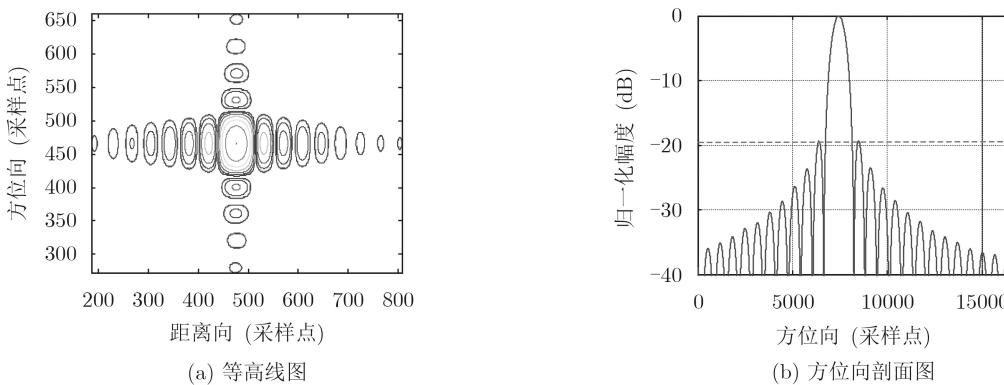


图6 运动目标回波成像结果

5 结论

HRWS成像模式是星载SAR未来的主要发展趋势之一。该模式的出现打破了SAR系统固有的限制，使得同时获取高分辨率和宽测绘带SAR图像成为了可能。通过考虑目标运动速度对于重构和成像

的影响，本文提出了一种运动目标重构算法和距离徙动校正方法，成功地实现了方位多通道下的运动目标频谱重构和聚焦成像。该算法的提出不仅弥补了传统重构算法的不足之处，而且在一定程度上拓宽了高分宽幅模式的应用领域。

参考文献

- [1] MOREIRA A, PRATS-IRAOLA P, YOUNIS M, *et al.* A tutorial on synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2013, 1(1): 6–43. doi: [10.1109/MGRS.2013.2248301](https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301).
- [2] SUESS M, GRAFMUELLER B, and ZAHN R. A novel high resolution, wide swath SAR system[C]. The IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium on Scanning the Present and Resolving the Future, Sydney, Australia, 2001: 1013–1015. doi: [10.1109/IGARSS.2001.976731](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2001.976731).
- [3] GEBERT N, KRIEGER G, and MOREIRA A. Digital beamforming on receive: Techniques and optimization strategies for high-resolution wide-swath SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 564–592. doi: [10.1109/TAES.2009.5089542](https://doi.org/10.1109/TAES.2009.5089542).
- [4] 范怀涛, 张志敏, 李宁. 基于特征分解的方位向多通道SAR相位失配校正方法[J]. 雷达学报, 2018, 7(3): 346–354. doi: [10.12000/JR17012](https://doi.org/10.12000/JR17012).
FAN Huaitao, ZHANG Zhimin, and LI Ning. Channel phase mismatch calibration for multichannel in azimuth SAR imaging based on Eigen-structure method[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(3): 346–354. doi: [10.12000/JR17012](https://doi.org/10.12000/JR17012).
- [5] 赵庆超, 张毅, 王宇, 等. 基于多帧超分辨率的方位向多通道星载SAR非均匀采样信号重建方法[J]. 雷达学报, 2017, 6(4): 408–419. doi: [10.12000/JR17035](https://doi.org/10.12000/JR17035).
ZHAO Qingchao, ZHANG Yi, WANG R, *et al.* Signal reconstruction approach for multichannel SAR in azimuth based on multiframe super resolution[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(4): 408–419. doi: [10.12000/JR17035](https://doi.org/10.12000/JR17035).
- [6] KRIEGER G, GEBERT N, and MOREIRA A. Unambiguous SAR signal reconstruction from nonuniform displaced phase center sampling[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(4): 260–264. doi: [10.1109/LGRS.2004.832700](https://doi.org/10.1109/LGRS.2004.832700).
- [7] PAPOULIS A. Generalized sampling expansion[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1977, 24(11): 652–654. doi: [10.1109/TCS.1977.1084284](https://doi.org/10.1109/TCS.1977.1084284).
- [8] LI Zhenfang, WANG Hongyang, SU Tao, *et al.* Generation of wide-swath and high-resolution SAR images from multichannel small spaceborne SAR systems[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(1): 82–86. doi: [10.1109/LGRS.2004.840610](https://doi.org/10.1109/LGRS.2004.840610).
- [9] 郭振永, 袁新哲, 张平. 一种多通道SAR高分辨率宽测绘带成像算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(2): 310–313. doi: [10.3724/SP.J.1146.2006.00986](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2006.00986).
GUO Zhenyong, YUAN Xinzhe, and ZHANG Ping. An algorithm of multichannel SAR high-resolution and wide-swath imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(2): 310–313. doi: [10.3724/SP.J.1146.2006.00986](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2006.00986).
- [10] PERRY R P, DIPIETRO R C, and FANTE R L. SAR imaging of moving targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(1): 188–200. doi: [10.1109/7.745691](https://doi.org/10.1109/7.745691).
- [11] MARQUES P A C and BIOUCAS DIAS J M. Moving targets processing in SAR spatial domain[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(3): 864–874. doi: [10.1109/taes.2007.4383579](https://doi.org/10.1109/taes.2007.4383579).
- [12] BARBAROSSA S and FARINA A. Space-time-frequency processing of synthetic aperture radar signals[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(2): 341–358. doi: [10.1109/7.727259](https://doi.org/10.1109/7.727259).
- [13] BAUMGARTNER S V and KRIEGER G. Simultaneous high-resolution wide-swath SAR imaging and ground moving target indication: Processing approaches and system concepts[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(11): 5015–5029. doi: [10.1109/JSTARS.2015.2450019](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2450019).
- [14] WANG Xiangyu, WANG R, LI Ning, *et al.* A method of estimating the velocity of moving targets for use in high-resolution wide-swath SAR imaging[J]. *Remote Sensing Letters*, 2018, 9(4): 305–313. doi: [10.1080/2150704X.2017.1420263](https://doi.org/10.1080/2150704X.2017.1420263).
- 王玉莹: 女, 1992年生, 博士生, 研究方向为高分宽幅SAR信号处理技术和动目标成像技术。
张志敏: 男, 1971年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为雷达系统与信号处理。
李 宁: 男, 1987年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为SAR信号处理。
范怀涛: 男, 1990年生, 助理研究员, 研究方向为高分辨率宽幅星载SAR成像。
赵庆超: 男, 1987年生, 博士生, 研究方向为高分宽幅星载SAR系统设计与信号处理。