

毫米波 SAR DBF-SCORE 成像算法 及系统级验证

吴思利, 王 辉

(上海卫星工程研究所, 上海 201109)

摘 要: 分辨率和幅宽是成像雷达的核心指标。面向当今高分宽幅的任务趋势, 基于毫米波的多通道合成-扫描接收体制是实现宽幅数据获取的有效技术途径, 具有实践价值。除了单一通道成像的基本策略之外, 机载多通道成像不但要完成运动补偿, 还需要根据实际回波特性实现多通道数据的有效校正与合成。本文针对 Ka 毫米波多通道系统的实测数据进行了具有较高稳健性的多通道合成成像处理, 实现了良好的聚焦效果与全幅宽信噪比提升, 为未来多通道雷达成像系统的大范围应用乃至在轨实时合成成像提供了一定的参考。

关键词: 合成孔径雷达; 雷达成像; 数字波束合成; 宽幅; 毫米波

中图分类号: TN 957.51; TP 945.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.02.014

Millimeter SAR DBF-SCORE Imaging Algorithm and System-Level Verification

WU Sili, WANG Hui

(Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: Resolution and swath are two key parameters for imaging radar. In terms of the mission requirements of high resolution and wide swath, it is of practical significance to use the millimeter-based digital beam forming scan-on-receive technique to obtain wide swath data. More complicated than the single-channel synthetic aperture radar (SAR) imaging strategy, airborne multi-channel imaging needs not only motion compensation but also data calibration and beam forming according to the echo properties. In this paper, the measured data of the Ka millimeter wave multi-channel system are processed by a highly robust multi-channel composite imaging process, and a good focusing effect and an improved full-width signal-to-noise ratio are obtained. It provides a certain reference for the large-scale application of the future multi-channel radar imaging system and even real-time synthetic imaging in orbit.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); radar imaging; digital beam forming; wide swath; millimeter wave

0 引言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是一种成像观测雷达, 与一般的光学遥感传感器相比, 能够全天时获取信息, 也不易受到天气影响^[1]。相比于单发单收及固定波束指向的基本模式, 灵活的波束扫描能力和多通道技术促使了近年来 SAR 技术的发展^[2], 大大提升了雷达成像对地观测能力。数字波束合成-扫描接收 (Digital Beam Forming SCan-On-REceive, DBF-SCORE) 是一种基于距离

向多通道的宽幅技术^[3], 利用小孔径发射宽波束实现高空间覆盖, 在接收端配置多个小孔径接收通道数据合成, 等效实现窄波束沿地距由近至远动态扫描, 提高系统增益并降低模糊能量引起的距离模糊^[4]。应用 DBF-SCORE 处理的 SAR 系统能够在不提高发射功率和数据率的前提下, 克服传统单通道 SAR 测绘带宽限制, 实现高信噪比信号获取, 具有广阔的应用前景^[5]。

德国的 SUESS 和 WIESBECK 率先提出了包含

收稿日期: 2021-01-15; 修回日期: 2021-02-03

作者简介: 吴思利 (1996—), 男, 硕士, 主要研究方向为 SAR 信号处理。

通信作者: 王 辉 (1972—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为毫米波 SAR 系统设计。

距离向 DBF-SCORE 的两位多波束系统概念,该系统能够显著克服方位欠采样与距离幅宽限制,弥补小天线发射孔径面积带来的增益损失。德国宇航局的 ANDREAS 等^[6-10]进行了 X、Ka 波段的多极化、多通道机载系统研制,并且深入分析了多通道定标处理方法;ADAMIUK 等^[11-12]提出了 C 波段和 X 波段混合的 DBF 体制;王帅启等^[13]面向毫米波频段 DBF-SCORE 的滑动聚束成像算法,开展了理论分析与信号处理仿真;王明辉等^[14]对 DBF-SCORE 下的 GMTI 问题也进行了阐述与仿真。以上研究都是基于 DBF-SCORE 的系统设计或者信号处理算法的理论分析,没有针对具体毫米波 DBF-SAR 数据进行的实测数据处理理论及验证。机载 SAR 系统配备 DBF 能力是未来先进天基 SAR 部署的必要技术验证途径,有必要针对机载毫米波 SAR 多通道数据发展通道合成理论。本文分析了毫米波 DBF-SAR 在距离向多通道 DBF-SCORE 处理下的雷达成像技术,通过系统级实测数据处理与分析验证了方法对宽幅场景的成像效果,改善了单通道系统的增益,提高图像信噪比。

1 DBF-SCORE 原理

根据 SAR 原理,固定波束指向下的探测幅宽由波束主瓣宽度、下视角以及平台高度决定。受限于平台供电能力以及元器件效率等因素,雷达能输出的辐射功率有限。为提高空间覆盖能力,无论是采用增大波束宽度、增大中心斜距、增大视角都会大大影响降低回波功率,影响信号质量:

$$\theta_r \approx \frac{\lambda}{H_r} \quad (1)$$

式中: θ_r 为距离向波束宽度; λ 为波长; H_r 为发射天线距离向孔径。天线波束宽度 θ_r 与波长 λ 呈正比,与天线尺寸 H_r 呈反比。因此,为了达到相同的波束宽度,波长越短时所需要的天线尺寸越小。

同时在宽测绘带下,跨周期功率进入预设的回波时间窗内也会影响系统性能,距离模糊(Range Ambiguity-to-Signal Ratio, RASR)严重。根据斜距-时间的对应关系,分析回波时序,如图 1 所示,设定测绘带沿斜距宽度为 W_r , R_n 为近端回波斜距, R_f 为远端斜距, R_c 为地球半径, θ 为入射角,则回波窗时宽 T_r 需要满足

$$T_r \approx T_p + \frac{2W_r}{c} = T_p + \frac{2R_f}{c} - \frac{2R_n}{c} \leq \frac{1}{2 \cdot F_{PR}} \quad (2)$$

式中: c 为光速; F_{PR} 为雷达系统脉冲重复频率; T_p 为发射脉宽。

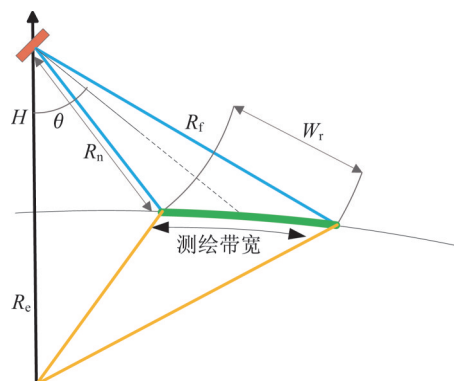


图 1 斜距模型

Fig.1 Range model

条带模式方位向分辨率 ρ_a 满足

$$\rho_a \geq \frac{L_a}{2} \quad (3)$$

式中: L_a 为天线方位向长度。方位向采样准则要求为实现方位向频率不混叠,获得全部有效分辨率,

$$F_{PR} \geq \frac{v}{\rho_a} \geq \frac{2v}{L_a} \quad (4)$$

式中: v 为雷达平台速度; F_{PR} 存在下界。测绘带斜距宽度 W_r 最大为

$$W_r < c \frac{\rho_a}{2v} - c \frac{T_p}{2} \quad (5)$$

得到方位分辨率与测绘带宽、发射时宽的矛盾关系如下:相同的轨道高度和发射时宽下,平台具有既定的速度,理想的方位分辨率要求距离向测绘带宽有限。雷达方程也显示,牺牲发射时宽会降低回波功率。因此,单发单收系统存在测绘带宽和信噪比、分辨率的固有矛盾,而距离向的 DBF-SCORE 体制能够通过增益提升,避免高发射功率,降低发射时宽,降低系统成本。如图 2 所示,距离向多通道接收时能够显著降低距离模糊。

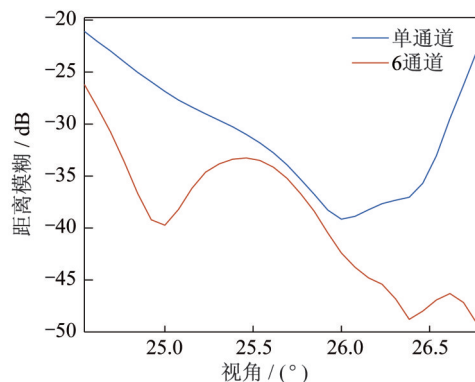


图 2 单通道与距离多通道 RASR 对比

Fig.2 RASR of multi-channel DBF in range

距离向多通道之间存在间距,根据时间-斜距-相位的对应关系需进行相位补偿。对于 N 通道接收系统,仅仅分析斜距-地距剖面,进行弥补不同通道由传播历程带来的相位差加权系数 $\omega_n(t)$ 为

$$\omega_n(t) = \exp \{ -j2\pi d_n \sin(\alpha(t))/\lambda \} \quad (6)$$

式中: λ 为波长; $d_n = [n - (N + 1)/2] \cdot d$, ($n = 1, 2, \dots, N$) 为第 n 个接收通道相对天线中心的距离,在通道非均匀排布情况下按照实际的斜距差设定即可; $\alpha(t)$ 为时变回波指向。

加权求和就相当于形成一个高增益窄波束在回波时间内扫描整个测绘带。通过 DBF 过程,理想均衡通道回波信号经过相干累加,理论信噪比改善可以达到 $20 \log_{10}(N)^{[15]}$ 。

2 毫米波多通道数据分析

通过机载 4 通道实测数据,进行多通道定标数据、回波数据、惯导数据分析。机载系统参数见表 1。

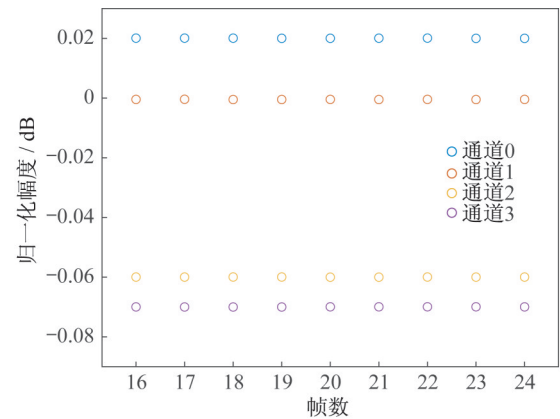
表 1 机载系统参数

Tab.1 Airborne system parameters

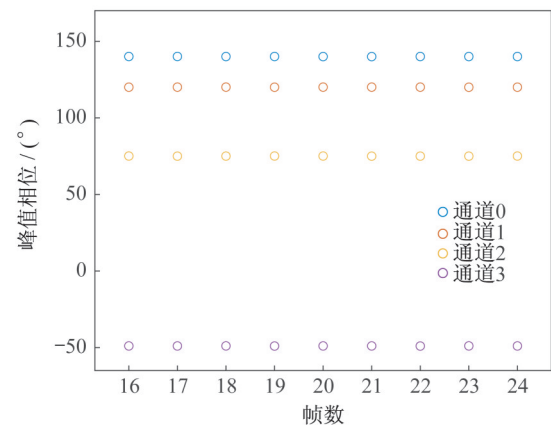
参数	数值
载频/GHz	35.75
带宽/MHz	200
飞行高度/m	3 000
采样频率/MHz	550
F_{PR}/Hz	2 400
发射脉宽/ μs	18
发射通道数	1
接收通道数	4
测绘带宽/km	2

在定标数据分析中,观察了多通道的幅频特性以及脉冲压缩后的峰值强度差异与峰值点稳定性。在如图 3 所示的定标数据性能上可以发现:通道间幅度一致性较好,相对参考通道的幅度差在 0.1 dB 以内;相位稳定性较为平稳,通道间相差稳定。

由图 4 所示的定标数据压缩剖面能够得出结论,通道间峰值旁边比一致,即二次及高次误差项近似,通道较为均衡。



(a) 多通道幅度特性



(b) 脉冲压缩后的峰值相位

图 3 定标多帧数据幅相特征

Fig.3 Amplitude and phase characteristics of calibration data

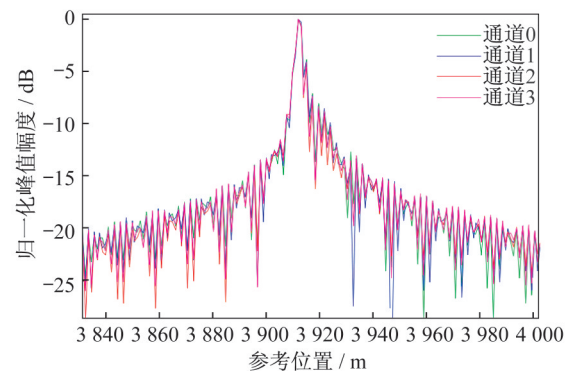


图 4 定标数据压缩剖面

Fig.4 Profile of compressed calibration data

受到气流、驾驶影响,机载 SAR 载具误差维持匀速直线运动,进而影响合成孔径过程^[12]。机载 SAR 系统配备的惯导子系统能够提供时序下的平台姿态 $\alpha_{imu}(t_a)$ 、速度 $v_{imu}(t_a)$ 、高度值 $H_{imu}(t_a)$,服务于 SAR 的成像聚焦。在多通道合成中,由于通道间相

差也受到上述的典型参数调制,经惯导数据补充的 SCORE 权 $\omega_{\text{inu}}(t, t_a)$ 扩充为方位、距离二维矩阵。

3 基于回波数据和惯导的多通道成像方法

基于回波数据和惯导数据的多通道合成成像流程如图 5 所示。从解包后的原始数据开始,数字处理环节包括预处理、DBF 合成、单通道处理三个部分:1)预处理完成 AD 采样后的正交解调、半带滤波、抽取和脉冲压缩;2)单通道处理以参考通道为数据输入,针对机载数据处理的补偿需求,完成包括多普勒中心估计和调频率估计后的运动误差拟合,最终服务于多通道合成数据聚焦的包络和相位补偿;3)DBF 合成应用时序输入的惯导数据更新 DBF-SCORE 权,并对残余的通道间三次以下相位梯度补偿。最后依次进行通道间固定幅度校正和通道合成及聚焦处理。其中,参考通道可根据幅、相位稳定性或链路噪声特性进行酌情选取。

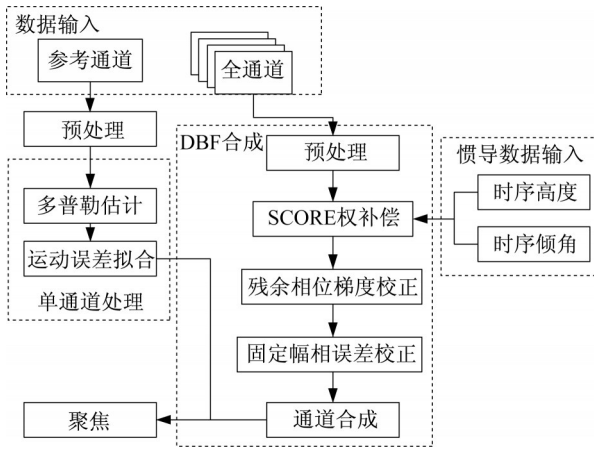


图 5 多通道成像流程

Fig.5 Procedure of DBF imaging

设定发射天线辐射信号形式为宽带调频信号:

$$s_t(t) = W \left(\frac{t}{T_p} \right) \exp(j2\pi f_c t + j\pi k_r t^2) \quad (7)$$

式中: W 为发射时窗; T_p 是发射时宽; f_c 为载频; k_r 为调频率。则根据一发多收设定,经变频、滤波、抽取后具有通道间回波时延差的基带回波 $s_n(t)$ 为

$$s_n(t) = A \cdot W \left(\frac{t - t_0 - \Delta t_n}{T_p} \right) \exp \left[-j2\pi f_c (t_0 + \Delta t_n) + j\pi k_r (t - t_0 - \Delta t_n)^2 \right] \quad (8)$$

式中: t_0 为参考通道时延。架设天线法向视角 β ,得到时延差 Δt_n 为

$$\Delta t_n = \frac{d_n}{c} \sin \left[\beta - \arccos \left(\frac{4(H + R_e)^2 - 4R_e^2 + (ct)^2}{4(H + R_e)ct} \right) \right] \quad (9)$$

回波与天线法向夹角 $\beta - \arccos \left(4(H + R_e)^2 - 4R_e^2 + (ct)^2 / 4(H + R_e)ct \right)$ 在参考通道对场景中心时延 t_c 泰勒展开:

$$\theta(t) \approx \beta - \theta(t_c) - \frac{d\theta(t)}{dt} \Big|_{t=t_0} (t - t_c) - \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} \Big|_{t=t_0} (t - t_c)^2 = k_\theta (t - t_c) \quad (10)$$

式中:调角率为

$$k_\theta = - \left\{ c \sqrt{(H + R_e)^2 (1 - \cos^2 \beta) + R_e^2} \right\} \div \left\{ 2(H + R_e) \sin \beta \cdot \left[(H + R_e) \cos \beta - \sqrt{(H + R_e)^2 (1 - \cos^2 \beta) + R_e^2} \right] \right\} \quad (11)$$

易知频域角调频率 $K_\theta \approx k_\theta / k_r$ [16]。第一项处理为频域的距离压缩,进行回波数据傅里叶变换:

$$S_n(f_r) = A W_{f_r} \left(\frac{f_r}{B_r} \right) \exp \left(-j\pi \frac{f_r^2}{k_r} \right) \exp \left(-j2\pi f_r \frac{d_n \sin \theta}{c} \right) \exp \left(j2\pi \frac{d_n K_\theta}{\lambda k_r} f_r \right) \quad (12)$$

在距离频域使用频域脉冲压缩滤波器 $H_r(f_r)$ 复乘,去除二次调频项:

$$H_r(f_r) = \exp \left(j\pi \frac{f_r^2}{k_r} \right) \quad (13)$$

完成距离压缩后,傅里叶逆变换得到时域信号 $c_n(t)$ 。考虑基于先验飞行参数和惯导数据的 $\omega_{\text{inu}}(t, t_a)$ 和方位维多帧采样 $c_n(t, t_a)$,多通道数据间在 DBF-SCORE 补偿后的信号仍然因载具运动误差、通道特性和地形地理因素存在残余相位,在直接合成后造成数据复向量抵消,损失增益。对于实时合成系统,完整的定标及验证模块是必要的,然而更简便的方法是基于数据块的回波参数估计。由于主要误差在方位向缓变,可以采取方位的时域子孔径分块降低估计、补偿次数。根据 SAR 原理,点目标的脉冲累积数服从合成孔径、平台速度及脉

冲重复频率 F_{PR} :

$$N_{\text{sample}} = F_{PR} \frac{\lambda R_0}{L_a v} \quad (14)$$

式中: R_0 为场景中心斜距; L_a 为方位向天线口径。谱分析惯导的三轴角、飞行高度波动量的峰值频率 $f_{\max}$, 合成孔径内分块数至少为

$$N_{\text{sub}} \geq N_{\text{sample}} \frac{f_{\max}}{F_{PR}} = \frac{\lambda R_0}{L_a v} f_{\max} \quad (15)$$

为避免分块间增益的明显跳变,子孔径可具有重叠部分。计算得出全场景内数据小块 $s'_{n,i}$ 与参考通道对应采样 $s'_{1,i}$ 间干涉相位 $\phi_{n,i}$:

$$\phi_{n,i} = \arg(s'_{n,i} \cdot s'^*_{1,i}), (n = 1, 2, \dots, N) \quad (16)$$

式中: $i \in [1, 2, \dots, I]$ 为数据块编号, 其中, I 为总块数。对 $\phi_{n,i}$ 沿距离向进行常量和一次、二次、三次的多项式拟合, 综合得到残余相位梯度、固定相位误差校正量为

$$\Phi_{n,i} = \varphi_{n,i} + b_{n,i}t + c_{n,i}t^2 + d_{n,i}t^3 \quad (17)$$

式中: $\varphi_{n,i}$ 为固定相位误差; $b_{n,i}$ 为一次相差系数; $c_{n,i}$ 为二次相差系数; $d_{n,i}$ 为三次相差系数。沿方位向合并分块估计量得到全局估计矩阵 Φ_n , 完成基于惯导数据和实测数据的 SCORE 权补偿及多通道合成:

$$S(t) = \sum_{n=1}^N \omega_n(t, t_a) \cdot c_n(t, t_a) \cdot \exp(-\Phi_n), \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (18)$$

由于惯导数据精度有限, 在后续的多普勒处理时可辅助进行粗处理或者不使用。沿航迹的分块补偿和存在于全局的高次通道间相差会对运动误差分析产生影响, 应用参考通道进行多普勒参数计算以及拟合, 实现高精度图像聚焦。

4 DBF-SCORE 实测数据处理试验

通常而言, SAR 有效幅宽边界处会有明显的图像质量下降, 主要原因包括处于距离向主瓣边缘造成的双程增益较低, 以及接收窗没有获得完全采集, 分别造成信噪比以及有效分辨率损失。

通过毫米波多通道 SAR 实测数据进行系统级验证, 成像观测区域为湖北省荆门市城区, 截取的测绘带远端场景面积约为 0.5 km^2 。单通道成像测绘带远端的聚焦图像如图 6 所示。

多通道直接 SCORE 合成结果如图 7 所示。图中可以发现, 图像增益不均衡, 可判读性甚至发生下降, 主要原因是由于通道间空间基线造成了沿幅



图 6 测绘带远端单通道成像结果

Fig.6 Swath far-end obtained by single channel imaging

宽的相位调制, 并且通道间存在固定相位误差。综合因素下, 信号相角差异这一动态值过大时, 多通道数据发生抵消, 相干信号不能尽可能累积。相位差存在一次以上高次项则体现在沿幅宽灰度值的波动性。



图 7 测绘带远端直接 SCORE 成像结果

Fig.7 Swath far-end obtained by direct SCORE imaging

本文所提出的 SCORE 权-残余平地相位梯度补偿-固定幅相误差校正的补偿策略, 综合目的是提高各通道信号相干性, 其成像结果如图 8 所示。可以发现由于补偿后径向不存在明显的相位调制, DBF 合成后边缘信息明显。



图 8 测绘带远端本文方法结果

Fig.8 Swath far-end obtained by the proposed method

将建筑阴影区域作为底噪与无阴影区域进行信噪比提升分析。对比单通道成像结果,4通道合成后图像信噪比提升 10.7 dB,其中建筑物阴影部分强度只提升了 1.5 dB。通过如图 9 所示的全画幅图像,能够判断整体增益一致性高。验证过程中值得注意的是通常在大入射角下后向散射极弱的水面回波也获得了一定的增益累积,显示了 DBF-SCORE 技术在海洋宽幅观测、地球水资源观测方面具有的潜力。



图 9 本文方法全画幅图像

Fig.9 Full swath image obtained by the proposed method

5 结束语

本文结合惯导数据和回波数据,改进了直接 DBF-SCORE 算法的实现方法,实现了更为稳健的多通道数据成像。首先分析了单通道 SAR 系统幅宽、分辨率、信噪比的固有矛盾,阐述了 DBF-SCORE 技术的可行性;从实测数据源针对定标数据、回波数据开展了量化分析;从系统级验证结果可以看出,通过提出的方法能够对测绘区域获得较为一致的增益提升,从而为高分宽幅 SAR 成像提供了一种解决方法。

参考文献

- [1] 王辉,赵凤军,邓云凯.毫米波合成孔径雷达的发展及其应用[J].红外与毫米波学报,2015,34(4):452-459.
- [2] SUN G C, XING M, XIA X G, et al. Beam steering SAR data processing by a generalized PFA [J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2013, 51(8):66-77.
- [3] SUESS M, GRAFMUELLER B, ZAHN R, et al. A novel high resolution, wide swath SAR system [C]// IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2001:1013-1015.
- [4] 郑世超,王辉,孙志强,等.Ka波段机载双模式干涉 SAR 系统设计与测量精度分析[J].上海航天,2018,35(6):1-7.
- [5] 韩子硕,王春平,郑武兴.合成孔径激光雷达成像误差补偿研究进展[J].飞航导弹,2019(5):84-89.
- [6] REIGBER A, SCHREIBER, MOREIYA A. The high-resolution digital-beamforming airborne SAR system DBF SAR [J]. Remote Sensing, 2020, 12(11):17-28.
- [7] PATYUCHENKO A, YOUNIS M, KREIGER G, et al. Design and optimization of the reflector antenna for an X/Ka-band spaceborne DBF SAR system [C]// European Conference on Antennas and Propagation. 2015:623-634.
- [8] BORDONI F, YOUNIS M, KRIEGER G. Performance investigation on the high-resolution wide-swath SAR system operating in multisubpulse mode [C]// 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012:155-167.
- [9] BORDONI F, YOUNIS M, KRIEGER G. Performance investigation on the high-resolution wide-swath SAR system operating in stripmap quad-pol and ultra-wide scansar mode [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012:399-411.
- [10] YOUNIS M, FISCHER C, WIESBECK W. Digital beamforming in SAR systems [J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2003, 41(7):17-34.
- [11] ADAMIUK G, SCHAEFER C, FISCHER C, et al. SAR architectures based on DBF for C-and X-band applications [C]// 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014:124-142.
- [12] ADAMIUK G, HEER C, LUDWIG M. DBF technology development for next generation of ESA C-band SAR mission [C]// 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Hamburg: IEEE, 2016: 189-211.
- [13] 王帅起,王辉,禹卫东.基于 DBF-SCORE 的 Ka 滑动聚束 SAR 信号处理方法研究[J].电子测量技术,2016, 39(10):171-178.
- [14] 王明辉,王辉.基于 DBF-SCORE 的 KaSAR-GMTI 信号处理方法研究[J].国外电子测量技术,2016,35(6):37-41.
- [15] WANG H, DAI S, ZHENG S C. Airborne Ka-band digital beamforming SAR system and flight test [C]// 2017 International Workshop on Remote Sensing with Intelligent Processing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2017:337-352.
- [16] 左伟华.高分辨率宽测绘带合成孔径雷达成像模式及算法研究[D].成都:电子科技大学,2016.