

# 方位多通道 SAR 的通道间误差影响分析

徐 辉 刘爱芳 夏 雷

(南京电子技术研究所 南京 210000)

**摘 要:** 方位多通道合成孔径雷达(SAR)通过多通道接收采样与方位频谱重构,突破了模糊设计约束,具备同时大幅宽和高分辨率的能力。然而,雷达系统多路接收通道间幅相不一致性和卫星姿态的不稳定等因素均造成通道间误差,造成 SAR 成像质量的下降。将基于通道误差对方位多通道 SAR 成像质量的影响展开,首先分析了存在通道误差时的多通道 SAR 信号模型,并给出存在通道误差时的通道误差补偿流程和频谱重构方法;根据给出的信号误差模型和频谱重构算法,结合仿真数据详细对比分析了不同通道误差对 SAR 成像性能的影响,相关分析结果用于指导方位多通道 SAR 系统通道系统设计。

**关键词:** 合成孔径雷达;方位多通道;频谱重构;成像质量

**中图分类号:** TN95      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.70

## Analysis of the effect of channel error on azimuth multi-channel SAR

Xu Hui Liu Aifang Xia Xue

(Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Nanjing 210013, China)

**Abstract:** The azimuth multi-channel SAR, which is based on multi-channel sampling and azimuth spectrum reconstruction, breaks through the ambiguity design constraints, and has the capability of wide swath and high resolution at the same time. However, the amplitude and phase inconsistency of the multi-channel and the instability of the satellite attitude cause the error, which results in the decrease of the SAR imaging quality. In this paper, the effect of channel error on the quality of azimuth multi-channel SAR imaging is studied. Firstly, the multi-channel SAR signal model with channel error is analyzed; the channel error compensation process and spectrum reconstruction method are presented; According to the signal error model and spectral reconstruction algorithm is given with simulation data, the influence of different channel errors on the performance of SAR is analyzed in detail, and the results are used to guide the design of multi-channel SAR system.

**Keywords:** SAR; azimuth multi-channel; spectrum reconstruction; imaging quality

## 1 引 言

星载合成孔径雷达(SAR)是一种主动式微波遥感设备,具备全天候、全天时对地观测能力,在军事和民生领域均有广泛应用。从1978年美国发射第1颗合成孔径雷达卫星SEASAT开始,星载合成孔径雷达逐步受到各国的重视,其应用领域也越来越多,近十年成为地观测领域的热点。

星载 SAR 的应用领域越来越多,各领域对星载 SAR 观测幅宽和分辨率要求也越来越高,传统星载 SAR 受制于方位模糊和距离模糊的限制,已无法满足这些越来越高的指标要求。方位多通道技术是实现星载 SAR 高分辨率、宽幅的一项主要技术途径,是国内外新一代星载 SAR 系统的

研究热点<sup>[1-6]</sup>。方位多通道 SAR 利用方位向不同位置的多路接收通道同时接收回波信号,每路信号分别采样和记录,地面成像处理过程中利用回波信号空时信息对回波信号进行频谱重构处理<sup>[6-8]</sup>,获取非模糊宽带信号,从而突破模糊设计约束<sup>[1-9]</sup>,同时实现大幅宽和高分辨率。

雷达系统多路接收通道的幅相不一致性和卫星姿态的不稳定等因素均会造成通道间的误差。本文将基于通道误差对方位多通道 SAR 成像质量影响展开,首先详细分析了存在通道误差时的多通道 SAR 信号模型,并给出存在通道误差时的通道误差补偿流程和频谱重构方法;根据给出的信号误差模型和频谱重构算法,结合仿真数据和实测数据详细分析了通道误差对 SAR 成像性能的影响,通过定量分析通道误差的影响确立不同系统的多通道 SAR 误差容差

范围,从而指导方位多通道 SAR 的误差控制。

## 2 方位多通道 SAR 信号模型

### 2.1 方位多通道 SAR 原理

方位多通道 SAR 工作原理如下图所示,平台飞行过程中单发射天线以  $1/PRF$  周期的发射脉冲,多路接收通道分别接收回波并采样记录,成像处理过程中将多路信号进行频谱重构恢复出非模糊信号。多路回波接收信号的采样间隔为  $\Delta X$ ,而同一通道不同重复周期期间的采样间隔为  $V/PRF$ 。多通道 SAR 回波信号满足均匀采样的条件<sup>[8-10]</sup>:

$$PRF = \frac{2V}{N\Delta X}$$

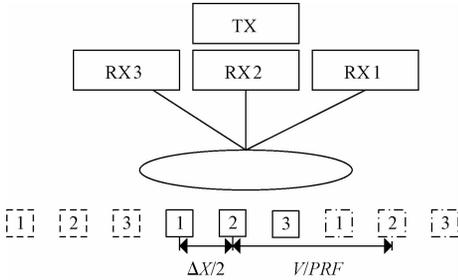


图 1 多通道 SAR 原理

由于星载 SAR 系统发射脉冲和星下点回波遮掩的影响,星载 SAR 系统的脉冲重复频率一般很难满足均匀采样的条件,存在重复频率低于或高于均匀采样重频两种情况,后面将分析不同重频下的通道误差对成像性能的影响。

### 2.2 方位多通道 SAR 的响应函数

方位多通道 SAR 系统采用单发多通道接收的方式,发射位置和接收位置不一致性。多通道 SAR 系统中,第  $j$  路接收通道相对发射相位中心偏移  $\Delta x_j$ ,则方位时刻  $t=0$ ,对应斜距为  $R_0$ ,多通道 SAR 系统方位向方位时域信号为:

$$H_{s,j}(t, \Delta x_j) = \omega_a(t) \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{+(v_s \cdot t)^2} + \sqrt{+(v_s \cdot t - \Delta x_j)^2})\right\} \quad (1)$$

针对(1)式进行二次项近似展开处理,方位多通道 SAR 的响应函数相对普通单通道 SAR 的响应函数相位偏移  $\Delta\varphi_j = -\pi \cdot \Delta x_j^2 / (2\lambda \Delta R_0)$  和时间延迟  $\Delta t_j = \Delta x_j / (2v_s)$

$$H_{s,j}(t, \Delta x_j) \approx \omega_a(t) \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} R_0\right\} \cdot \exp\left\{-j \frac{\pi \cdot \Delta x_j}{2\lambda R_0}\right\} \exp\left\{-j \frac{2\pi \cdot v_s^2}{\lambda R_0} \left(t - \frac{\Delta x_j}{2v_s}\right)^2\right\} \quad (2)$$

$$H_{s,j}(t, \Delta x_j) = H_s(t - \Delta t_j) \cdot \exp\{j\Delta\varphi_j\} \quad (3)$$

根据式(3),在多普勒频域,可将多通道 SAR 响应函数  $H_{s,j}(f)$  可表示将单通道 SAR 响应函数  $H_s(f)$  和多通道影响因子<sup>[5]</sup>:

$$H_{s,j}(f) = H_s(f) H_j(f) \quad (4)$$

$$H_j(f) = \exp\left\{-j \frac{\pi \cdot \Delta x_j^2}{2\lambda R_0}\right\} \exp\left\{-j \frac{\pi \cdot \Delta x_j}{v_s} f\right\} \quad (5)$$

## 3 存在通道误差的信号模型和频谱重构

### 3.1 存在通道误差的信号模型

雷达系统多路接收通道间误差主要由平台姿态抖动和接收通道幅相不一致性两方面因素<sup>[11-13]</sup>。第 1 种误差是平台姿态造成雷达系统不同接收通道传输路径的差别,从而引入通道间相位误差。平台的横滚、俯仰、偏航三姿态均会造成不同程度的通道误差,其中偏航影响最大<sup>[12-14]</sup>。第 2 种误差主要是各接收链路自身响应特性的幅相差别,主要包括天线接收方向图、接收链路的幅相不一致性。

假定平台姿态造成天线方位斜视角为  $\theta_c$ ,接收链路造成不同接收通道误差的幅度变化系数为  $a_j^e$  (相对理想响应函数的比例因子),接收链路引入通道间相位误差为  $\varphi_j^e$ 。则存在通道误差时,多通道 SAR 系统的方位时域信号为:

$$H_{s,j}(t, \Delta x_j) = a_j^e \cdot \omega_a(t - t_c) \cdot \exp\{j\varphi_j^e\} \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{+(v_s \cdot t)^2} - 2t \cdot \sin\theta_c + \sqrt{+(v_s \cdot t - \Delta x_j)^2} - 2\sin\theta_c)\right\} \quad (6)$$

针对式(6)进行二次项近似展开处理,该式可以表示为:

$$H_{s,j}(t, \Delta x_j) \approx a_j^e \cdot \omega_a(t - t_c) \cdot \exp\{j\varphi_j^e\} \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi R_c}{\lambda}\right\} \cdot \exp\left\{-j \frac{\pi \cdot x_j \cdot \cos^2\theta_c}{2\lambda R_c}\right\} \exp\left\{-j \frac{2\pi \cdot v_s^2 \cos^2\theta_c}{\lambda R_c} \left(t - \frac{\Delta x_j}{2v_s}\right)^2\right\} \exp\left\{j \frac{4\pi v_s \sin\theta_c}{\lambda} \left(t - \frac{\Delta x_j}{2v_s}\right)\right\} \quad (7)$$

将时域信号转换至频域,可将点目标的方位向响应函数表示为:

$$H_{s,j}(f) = W_a(f - f_c) H_{\varphi_j} H_j(f) H_s(f) \quad (8)$$

$$H_{\varphi_j} = A_j^e \exp\{j\varphi_j^e\} \cdot$$

$$\exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x_j \sin\theta_c\right\} \exp\left\{-j \frac{\pi \cdot \Delta x_j^2 \cdot \cos^2\theta_c}{2\lambda R_c}\right\} \quad (9)$$

$$(H_j(f) = \exp\left\{-j \frac{\pi \cdot \Delta x_j}{v_s} f\right\}) \quad (10)$$

式中:  $H_s(f)$  为单通道 SAR 响应函数,  $H_{\varphi_j}$  为通道间误差引入的通道间误差项,可见该误差与多普勒频率无关,  $H_j(f)$  多通道 SAR 对冲激响应函数的影响项。通道误差项中幅度第 1 项为接收链路引入幅度误差;相位项相位第 1 项为接收链路引入相位误差,相位项第 2 项为方位向扫描角造成通道间相位差,第 3 项为不同接收通道相位中心位置不同引入通道间相位差。

### 3.2 方位多通道 SAR 采样和频谱重构

方位多通道 SAR 频谱重构算法基于信号采样原理, SAR 带限信号  $U(f)$  通过  $N$  路独立接收通道并分别以  $1/N$  奈奎斯特频率采样,  $N$  路接收通道的响应函数为  $H_j(f)$  线性系统,则可以从  $N$  路采样信号中恢复出唯一的带限信号  $U(f)$ <sup>[1,4-5]</sup>。

根据频谱重构原理,多通道 SAR 系统引入多通道误差

后,其带限信号  $U(f)$  采样和恢复的过程如下表示:

$$U_e(f) = P(f) \cdot H_{ej} \cdot H(f) \cdot U(f) \quad (11)$$

$$U(f) = \begin{bmatrix} U(f) \\ U(f + PRF) \\ \vdots \\ U(f + (N - 1)PRF) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$H(f) = \begin{bmatrix} H_1(f) & \cdots & H_N(f) \\ H_1(f + PRF) & \cdots & H_N(f + (N - 1)PRF) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_1(f + (N - 1)PRF) & \cdots & H_N(f + (N - 1)PRF) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$H_{ej} = \begin{bmatrix} H_{e1} & H_{e2} & \cdots & H_{eN} \\ H_{e1} & H_{e2} & \cdots & H_{eN} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{e1} & H_{e2} & \cdots & H_{eN} \end{bmatrix} = HL_{ej} \cdot HZ_{ej} \quad (14)$$

$$P(f) = N \cdot H(f)^{-1} = \begin{bmatrix} P_1(f) & P_1(f + PRF) & \cdots & P_1(f + (N - 1)PRF) \\ P_2(f) & P_2(f + PRF) & \cdots & P_2(f + (N - 1)PRF) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_N(f) & P_N(f + PRF) & \cdots & P_N(f + (N - 1)PRF) \end{bmatrix} \quad (15)$$

根据存在通道误差的频谱重构过程可知,若要恢复理想的  $U(f)$ ,恢复出原始信号的条件是  $H(f)$  可逆,并且需要在频谱重构过程中补偿通道间误差。根据多通道 SAR 的采样和频谱重构函数可知,通道间误差与多普勒频率无关,因此可先于频谱重构进行补偿,多通道 SAR 的通道间两类误差不影响频谱重构滤波器的构建。

#### 4 通道误差对成像性能仿真分析

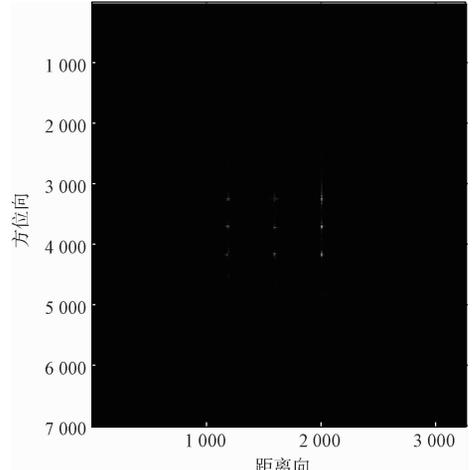
根据上述多通道 SAR 的信号频谱重构模型,采用如下系统参数开展多通道频谱重构仿真,仿真参数如表 1 所示,并对比分析不同程度的幅度和相位误差对成像性能的影响<sup>[6,13,15-16]</sup>。

表 1 仿真参数

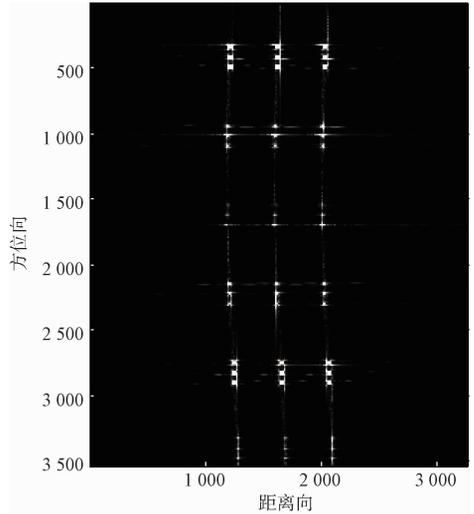
轨道高度	510 km
波长	0.031 25 m
发射信号带宽	300 MHz
接收通道数	6
发射天线方位尺寸	2.8 m
接收天线方位尺寸	1.6 m
天线距离向尺寸	1.2 m
主星速度	7 560 m/s
PRF	1 200~1 800 Hz
通道误差	均匀分布

如图 1 所示,图(a)为基于仿真参数的点目标成像结果,图(b)为存在通道误差为的仿真成像结果。相比理想多

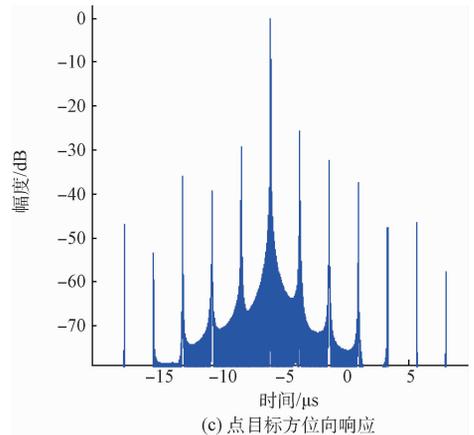
通道成像,存在通道误差时,点目标两侧可见非常严重模糊信号,在图像上形成散布。图(c)仿真的方位向目标响应函数,存在通道误差时在主峰两侧形成成对的模糊信号。



(a) 理想点目标成像仿真



(b) 存在通道误差下点目标仿真



(c) 点目标方位向响应

图 1 点目标仿真结果

图 2 所示统计分析了高中低 3 种重频、不同通道误差下造成的模糊恶化情况,横坐标为模糊度,纵坐标不同模糊

分布百分比,误差为均匀分布。根据分析可知:1)重频越高模糊性能越好,如图 2(a)~(c)三图中存在  $5^\circ$  相位误差下的模糊分布(点划线)高重频下模糊约在  $-42 \sim -40$  dB,而低重频下已恶化为  $-35 \sim -34$  dB。2)随着通道误差的增大,模糊性能也快速恶化;高低重频(高重频高于均匀采样,低重频低于均匀采样)下模糊恶化明显比均匀采样的模糊性能恶化严重。图 2(b)为均匀采样时的不同通道误差影响,模糊随通道误差的恶化程度明显弱于图 2(a)、(c)给出的高低重频两种情况。3)通道间幅度误差对模糊性能影响

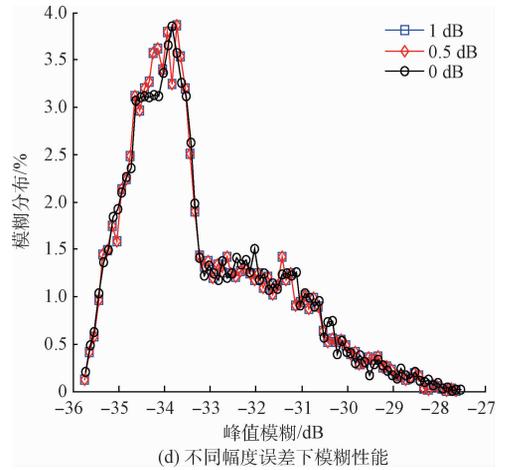
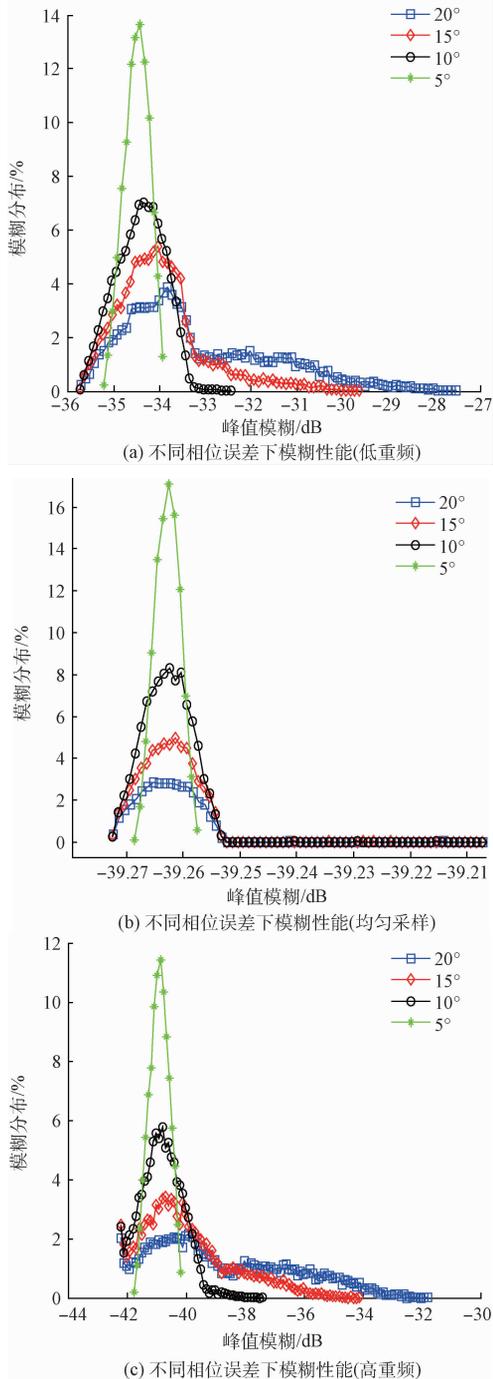


图 2 不同通道误差的模糊特性分析

比相位误差影响要小,图 2(d)分析了  $5^\circ$  相位误差,不同幅度误差的影响。由图 3 可见对模糊影响起决定作用的是通道间相位误差,因此不同幅度误差下,模糊分布基本相同。

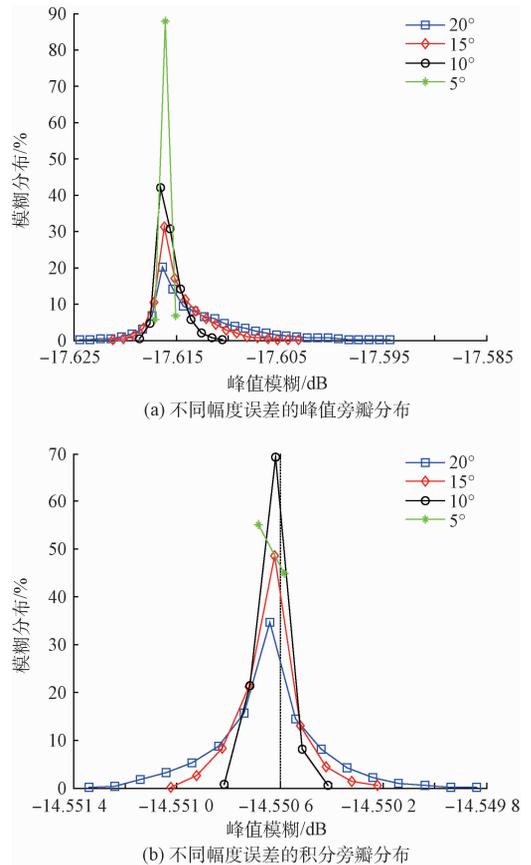


图 3 不同通道误差下点目标性能

根据上述分析可知,通道间幅相误差对多通道成像性能造成的主要影响是模糊电平的抬升,对其他成像性能响较

小,因此 SAR 系统设计过程需要重点关注模糊性能。模糊性能与重频有关,重频越高模糊性能越好;重频不同,通道误差对多通道 SAR 模糊性能影响也不同,重频越接近均匀采样重频,通道误差对 SAR 模糊性能影响也越小,因此将重频控制在均匀采样重频附近是减少通道误差影响的重要原则。

## 5 结 论

本文给出了存在通道误差时的多通道 SAR 信号模型,并给出存在通道误差时的通道误差补偿流程和频谱重构方法;根据给出的信号误差模型和频谱重构算法,结合仿真数据和实测数据详细分析了通道误差对 SAR 成像性能的影响。根据仿真分析结果可知,通道间幅相误差对多通道成像性能造成的主要影响是模糊电平的抬升,对其他成像性能影响较小。模糊性能与重频有关,重频越高模糊性能越好;重频不同,通道误差对多通道 SAR 模糊性能影响也不同,重频越接近均匀采样重频,通道误差对 SAR 模糊性能影响也越小。因此 SAR 系统设计过程中通道间相位误差控制尤为重要,不同重复频率的选择应该以靠近均匀采样重频为准则。

## 参考文献

- [1] GEBERT N, KRIEGER G. Azimuth phase center adaptation on transmit for high resolution wideswath SAR imaging [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(4):782-786.
- [2] 侯丽丽,郑明洁,宋红军,等. 多通道高分辨率宽测绘带 SAR 系统杂波抑制技术研究[J]. 电子与信息学报, 2016,38(3):635-642.
- [3] RINCON R F, VEGA M A, BUENFIL M. NASA's L-band digital beamforming synthetic aperture radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2011, 49(10):3622-3628.
- [4] 孙佳. 国外合成孔径雷达卫星发展趋势分析[J]. 装备指挥技术学院学报, 2009, 18(1): 67-70.
- [5] 梁维斌,李春升,周荫清. 基于多通道天线高分辨率星载 SAR 实现方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004,30(9):826-830.
- [6] 刘艳阳,李真芳,杨桃丽,等. 一种单星方位多通道高分辨率宽测绘带 SAR 系统通道相位偏差时域估计新方法[J]. 电子与信息学报 2012, 34(12): 2913-2919.
- [7] 王欣欢,陈怀海. 一种改进的频谱修正算法[J]. 国外电子测量技术,2016,35(11):27-31.
- [8] JING W, XING M D, QIU C W, et al . Unambiguous reconstruction and high resolution imaging for multi-channel SAR and airborne experiment results[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2009,6(1):102-106.
- [9] 徐辉,赵迪,辛培泉,等. 星载 SAR 方位模糊研究[J]. 火控雷达技术,2011,40(2):1-5.
- [10] GEBERT N, KRIEGER G. Digital beamforming on receive: Techniques and optimization strategies for high-resolution wide-swath[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(2): 692-698.
- [11] 桃丽,李真芳,刘艳阳,等. 两种星载高分辨宽测绘带 SAR 系统通道相位误差估计方法[J]. 电子学报, 2013, 41(5):931-935.
- [12] 马仑,廖桂生,李真芳. 多通道 SAR 误差估计与补偿方法及其实测数据验证[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6):1305-1309.
- [13] 杨凤凤,王敏,梁甸农. 基于非均匀采样的小卫星多通道 SAR 无模糊成像[J]. 电子学报, 2007, 35(9): 1754-1756.
- [14] 徐健,宋晓萍. 基于变分贝叶斯的 DR/UTP 组合导航滤波方法 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12) 2743-2749.
- [15] 朱伦伦,熊九龙,谢金哲,等. 基于蒙特卡罗仿真的校准结论风险分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(7):1045-1051.
- [16] XU W, DENG Y. Multichannel SAR with reflector antenna for high resolution wideswath imaging [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 9(1): 1123-1126.

## 作者简介

**徐辉**,1979 年出生,硕士,高级工程师,主要研究方向 SAR 系统设计和信号处理。

E-mail: xhmail@yeah.net

**刘爱芳**,1975 年出生,博士,研究员,主要研究方向为 SAR 总体设计。

E-mail: xuexia1992@126.com

**夏雪**,1992 年出生,硕士,工程师,主要研究方向为 SAR 系统设计和信号处理。

E-mail: lafsx1997@163.com