

一种改进的机载 SAR 二维空变辐射校准方法^{*}

刘云龙^{1,2} 周良将² 李焱磊² 梁兴东²

(1. 中国科学院大学 北京 100049; 2. 中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190)

摘要: SAR 辐射校准是利用图像灰度值反演地物后向散射系数的前提,校准精度直接影响后续的定量遥感技术应用。由于机载平台易受气流扰动而姿态不稳定,导致 SAR 天线的辐射功率在方位向产生波动,从而降低辐射校准精度。传统的二维空变辐射校准方法可以补偿这种误差,但是该方法只在积分法下有效。该文提出一种改进方法,改进方法不但可以同时积分法和峰值法下获得良好的校准结果,而且能够改善点目标的冲激响应宽度和峰值旁瓣比等指标。仿真实验和实测数据处理结果验证了改进方法的有效性。

关键词: 机载 SAR; 辐射校准; 二维天线方向图; 姿态波动

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Upgrade 2-D azimuth-variant radiometric calibration method for airborne SAR

Liu Yunlong^{1,2} Zhou Liangjiang² Li Yanlei² Liang Xingdong²

(1. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 2. National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: SAR radiometric calibration is the premise of object backscatter coefficient inversion using image intensity and the calibration accuracy directly affects the subsequent quantitative remote sensing technology application. Airborne platforms is vulnerable to air turbulence and then its attitude is unstable, resulting in SAR antenna radiation power's fluctuation in azimuth, thus reduces the radiometric calibration accuracy. The traditional two-dimensional space variant radiometric calibration method can compensate this error, while this method is effective only in the integration method. This paper proposes an improved method which not only can get good calibration results with both integral method and peak value method, but also can improve the index of the point target's impulse response width and peak sidelobe ratio. Simulation and real data processing results show the effectiveness of the improved method.

Keywords: airborne SAR; radiometric calibration; 2-D antenna pattern; vibrate attitude

1 引言

机载合成孔径雷达(Airborne SAR)因具有高机动性和高分辨率等优点,在军用和民用领域拥有广阔的应用前景^[1]。由于机载 SAR 平台会受到气流扰动,其姿态变化引起天线视角变化。对于方位向天线波束角很窄的情况(如 X 波段 SAR 方位波束宽度通常只有 2~3°),当载机遭遇较为严重的气流扰动时,姿态角(偏航、俯仰和横滚)会有较大的波动,导致天线增益在方位向和距离向均发生变化,从而使 SAR 图像在方位向出现明显的明暗变化,增加了辐射校准的难度。传统的辐射校准^[2]仅考虑天线方向

图的距离向增益和距离衰减两个因素,没有考虑姿态变化对辐射的影响,无法完全满足机载 SAR 辐射校准的需求,因此不利于与 SAR 图像幅度相关的应用^[3-5]。

为了消除 SAR 图像在方位向的明暗变化,F-SAR 团队提出了一种二维空变辐射校准方法,该方法利用实时测量的载机平台飞行轨迹和姿态数据,结合二维天线方向图来计算图像中每个像素的增益,然后进行逐像素增益补偿^[6]。该方法虽然可以消除图像在方位向的明暗变化,但是在定量化辐射校准方面存在一定的缺陷:积分法和峰值法是辐射校正效果检验过程中常用的两种目标功率提取方法,F-SAR 二维空变辐射校准方法仅在利用积分法获

收稿日期:2016-03

* 基金项目:国家 863 计划项目(2013AA092105)、测绘公益专项(201412002)资助

取目标功率进行检验时有效,在利用峰值法获取目标功率进行检验时无效。另外,天线的姿态变化不仅造成了接收能量的变化,还改变了 SAR 图像的点扩展函数,F-SAR 二维空变辐射校正方法不能改善目标的冲激响应宽度(IRW)和峰值旁瓣比(PSLR)等性能。

本文从机载 SAR 系统和成像原理出发,借鉴精确地形和孔径依赖的运动补偿(precise topography and aperture-dependent motion compensation, PTA-MoCo)算法^[7]的思路,提出了一种改进的二维空变辐射校准方法。改进算法利用二维天线方向图、POS 姿态、线性调频信号的时频对应关系以及频谱估计和多普勒补偿窗来完成方位向辐射校准。

2 原理和方法

2.1 一维空变辐射校准原理

辐射校准用于从 SAR 图像中反演地面目标归一化的后项散射系数 σ 。从雷达方程出发^[8]:

$$P_r = \sigma \frac{P_t l^2 G_0^2}{(4\rho)^3 R^4} \quad (1)$$

式中: P_t 为发射功率, l 为雷达波长, R 为雷达地面目标的距离, G 为天线增益(G 是俯仰角 θ 和方位角 φ 的函数,由二维天线方向图求取), P_r 表示接收功率。考虑到 SAR 在方位向的回波叠加关系:

$$P_R = \sigma \int_{t_0}^{t_1} \frac{P_t l^2}{(4\rho)^3} \frac{G^2(t)}{r^4(t)} dt \quad (2)$$

式中: $G(t)$ 和 $r(t)$ 分别表示方位时刻 t 下的天线增益和目标斜距, t_0 和 t_1 分别表示合成孔径开始和结束时间。假设 $r(t)$ 取近似值最近斜距 R ,并忽略天线增益在方位向上的差异,则:

$$P_R = K\sigma \frac{G^2(\theta)}{R^3} \quad (3)$$

式中: K 为比例系数。上式表明,如果只进行相对辐射校准,则一维空变辐射校准只需校正天线增益随俯仰角的变化和因信号在空间传播造成的衰减。

2.2 平台姿态变化对辐射校准的影响

在搭载平台稳定性好的前提下,比如星载 SAR、装备伺服平台的机载 SAR 或者气流稳定载机平台姿态变化幅度小的情况下,上一节提及的一维空变辐射校准方法是行之有效的。但是在气流不稳定载机平台姿态变化幅度较大的情况下,天线增益在方位向上的差异将不容忽视,严重时可导致 SAR 图像方位向出现明显的明暗变化,如图 1 所示的 SAR 图像。此时不同方位向目标对应的天线增益存在较大差异,接收信号强度 P_R 受姿态影响的示意如图 2 所示。此时式(2)中 P_R 变为:

$$P_R = \frac{K}{R^3} \sigma \int_{t_0}^{t_1} G^2(t) dt \quad (4)$$

接下来用点目标仿真进一步说明姿态变化对辐射校准的影响。在同一方位向设定 15 个点目标,点目标布置



图 1 姿态变化较大时的 SAR 图像

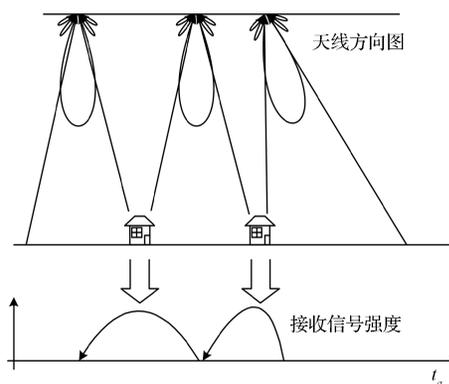


图 2 接收信号强度受姿态影响示意

情况如图 3 所示。在仿真回波数据时,一种情况不考虑姿态变化,另一种情况考虑姿态变化,仿真采用的姿态数据如图 4 所示。由于天气问题,载机平台受到较为严重的气流影响姿态波动较大,偏航角变化范围接近 2° (一般情况下小于 0.5°)。

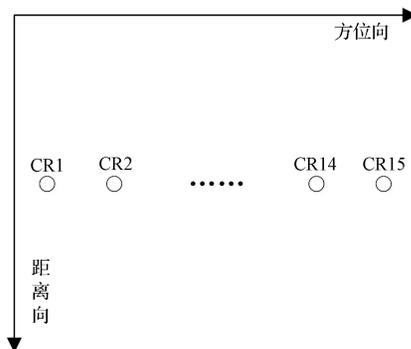


图 3 点目标仿真示意

利用点目标进行 SAR 辐射定标具有简单实用、精度较高的优点^[9]。文献^[10-11]给出了两种用点目标做辐射校准的方法:用点目标脉冲响应的峰值作为评价依据的方法称为峰值法;用点目标脉冲响应函数的积分能量作为评价依据的方法称为积分法。当聚焦效果良好时,峰值法在信噪比较差时仍能获得较高的校准精度,而积分法

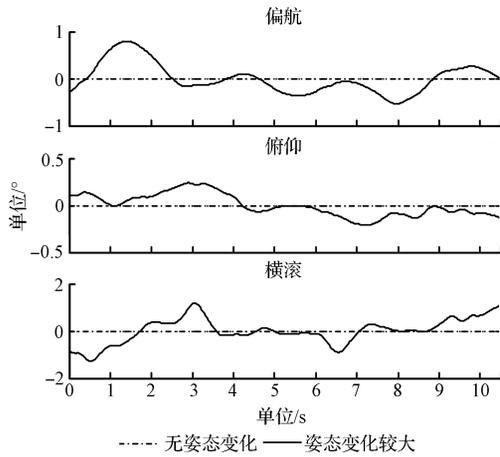


图4 仿真使用的姿态数据

不受聚焦程度的影响,但与衰落相关联的误差比峰值法略有增加。

用峰值法和积分法检验点目标仿真结果,不考虑姿态变化时,处于同一距离门不同方位处的点目标具有相同的天线增益,其积分能量和峰值功率是不变的;考虑姿态变化时的点目标积分能量和峰值功率变化如图5所示。

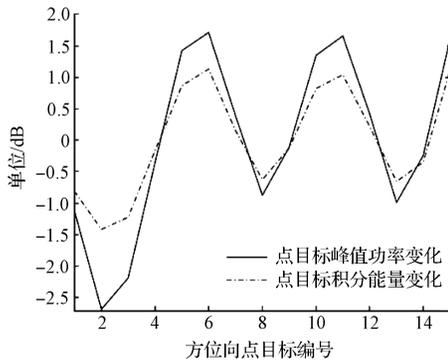


图5 峰值法和积分法下点目标辐射功率变化

图5表明,在姿态变化较大的情况下,同一方位向的点目标积分能量和峰值功率会产生明显的变化,且变化范围大致在 $[-2, 2]$ dB区间内。由此可见,若使用传统的一维辐射校准方法则无法补偿方位向的幅度变化,从而有必要使用考虑姿态变化的二维辐射校准方法。除此之外,点目标的积分能量和峰值功率的变化量并不一致,这不利于辐射校准结果的检验。

2.3 传统的二维空变辐射校准方法

平台姿态变化下接收能量 P_R 的表达式如式(4)所示。传统的二维空变辐射校准利用二维天线方向图 $G_A(\theta, \varphi)$ 和 SAR 成像几何和坐标系投影关系获得 $G(t)$, 并通过累加计算式(4)中的 P_R , 最后补偿 SAR 图像的空变辐射误差。

如图6所示为 SAR 的成像几何关系示意,其中 P_a 和 P_t 分别表示天线相位中心和地面目标位置, θ_y 、 θ_p 和 θ_r 分

别表示载机平台的偏航、俯仰和横滚角, θ_{sq} 表示瞬时斜视角。因为载机姿态发生变化,天线的方位角和俯仰角随之变化,天线增益也会随之发生变化。由成像几何关系可知在大地坐标系下瞬时波束指向 \vec{e}_0 为 $\vec{P}_a \vec{P}_t$, 通过坐标投影关系^[12], 可求出载机坐标系下天线的波束指向 \vec{e} 为:

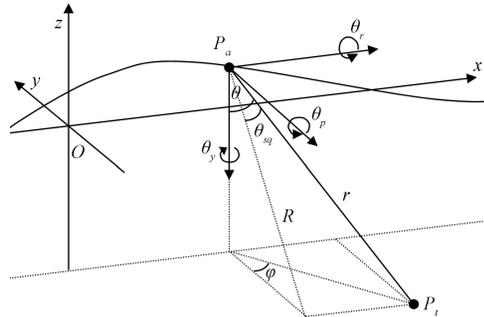


图6 SAR 成像几何

$$\vec{e} = M_y M_p M_r \vec{e}_0 \quad (5)$$

式中: M_y 、 M_p 和 M_r 为坐标旋转矩阵。通过 \vec{e} 可进一步求得载机坐标系下天线的方位角 φ 和俯仰角 θ 。在已知二维天线方向图的情况下可求得瞬时天线增益 $G(t)$ 为 $G_A(\varphi, \theta)$, 同理可求得理想情况下的天线增益 $G_0(t)$ 为 $G_A(\varphi_0, \theta_0)$ 。因此可得传统二维空变辐射校准表达式见式(6), 流程如图7所示。

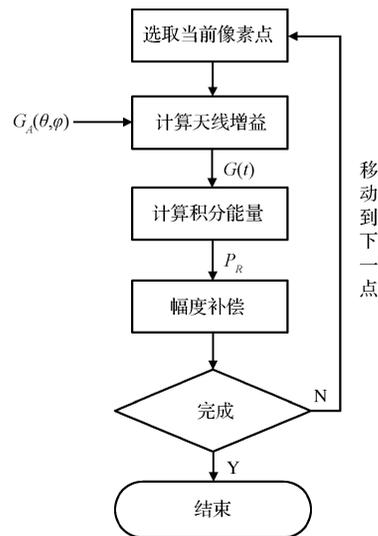


图7 传统二维空变辐射校准方法流程

$$s_0(\tau, t) = \frac{\int_{t_0}^{t_1} G_0^2(\varphi_0, \theta_0; t) dt}{\int_{t_0}^{t_1} G^2(\varphi, \theta; t) dt} \cdot s(\tau, t) \quad (6)$$

为说明传统二维空变辐射校准方法能解决的问题和存在的缺陷,对2.2节中加入姿态变化的仿真数据用传统方法进行处理,并分别使用峰值法和积分法来检验点目标的辐射功率变化,检验结果如图8所示。

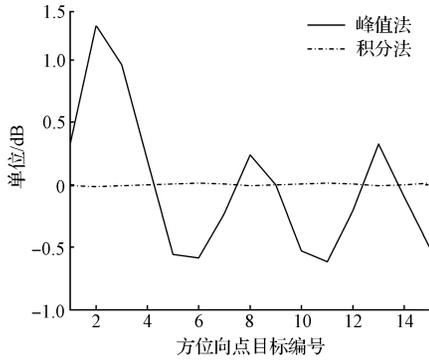


图8 传统二维辐射校准方法检验结果

图8表明,传统方法只能满足积分法的检验准则,不能满足峰值法。

为进一步阐释传统方法的局限性,考查 SAR 成像原理中方位压缩之后的方位向 IFFT。多普勒频域函数 $S(f_a)$ 和方位时域的点扩展函数 $s(t)$ 互为傅里叶变换对,并且多普勒频率和斜视角之间存在一一映射关系:

$$f_a = \frac{2v\sin(\theta_a)}{\lambda} \quad (7)$$

式中: f_a 表示多普勒频率, v 表示飞行速度, θ_a 表示瞬时斜视角, λ 表示波长。若不考虑成像过程中方位向加窗这一操作,式(7)这种角频对应关系可将 $G(t)$ 映射为多普勒频谱的幅度 $G(f_a)$,示意如图9所示。

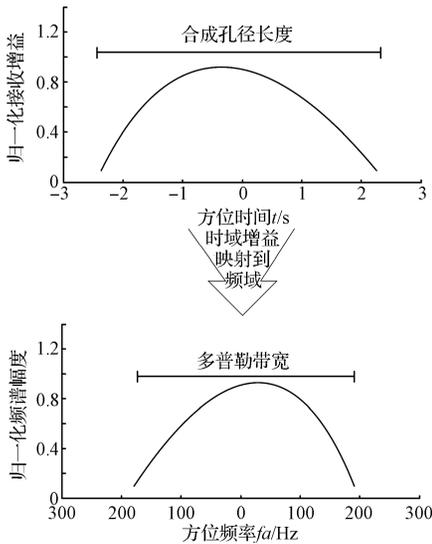


图9 角频对应关系示意

$S(f_a)$ 的频谱幅度 $G(f_a)$ 和 $s(t)$ 之间满足帕斯瓦尔定理,因此传统方法只能满足积分法的检验准则。由传统方法还可以推广出一种只满足峰值法的校准方法,只须将式(6)中的平方去掉,即:

$$s_0(\tau, t) = \frac{\int_{t_0}^{t_1} G_0(\varphi_0, \theta_0; t) dt}{\int_{t_0}^{t_1} G(\varphi, \theta; t) dt} \cdot s(\tau, t) \quad (8)$$

式(8)所表达的校准方法之所以能满足峰值法,理论依据依然是傅立叶变换的基本性质。仿真实验证实了这一推广方法,如图10所示。

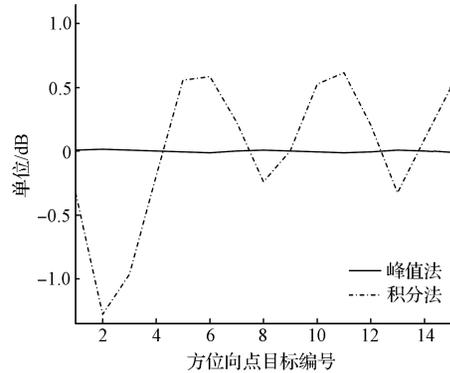


图10 推广方法的检验结果

从积分法和峰值法的定义得知,积分法衡量的是点扩展函数 $s_0(\tau, t)$ 的平均功率,峰值法衡量的是 $s_0(\tau, t)$ 的峰值功率,若要同时满足积分法和峰值法,必须修正频域加权系数。从另一个角度来看,不同的姿态变化会形成不同的频域加权 $G(f_a)$,从而导致点目标的点扩展函数受到影响,最终改变点目标的峰值功率、积分能量,甚至是点目标质量参数 IRW 和 PSLR。

3 改进的二维空变辐射校准方法

3.1 算法改进

为解决第2章中提及的传统二维辐射校准方法的局限性,本文提出了一种改进的方法。该方法的改进借鉴了 PTA-MoCo 算法的思路。PTA-MoCo 是一种基于短时快速傅里叶变换的后处理算法,该算法利用角频对应关系,逐像素点地计算时域残余相位误差并映射到多普勒域进行补偿^[7]。传统的二维校准方法给出了获得 $G(t)$ 的方法,本文提出的改进算法是在获得 $G(t)$ 的基础上,借鉴 PTA-MoCo 算法的思路,将 $G(t)$ 通过角频对应关系映射到多普勒域得到频域加权 $G(f_a)$,通过式(9)更为精确地补偿因姿态变化造成的辐射误差。

$$S_0(\tau, f_a) = \frac{G_0(f_a)}{G(f_a)} \cdot S(\tau, f_a) \quad (9)$$

3.2 处理流程

改进算法的处理流程如图11所示。首先选定图像有效测绘区域的起始点坐标,以该点为中心在方位向截取长度为 L 的复数据;然后进行傅里叶变换到多普勒域获得 $S_0(\tau, f_a)$;接下来利用当前选定点在合成孔径时间内的 POS 姿态数据、成像几何参数和二维天线方向图获得天线增益,并通过角频对应关系映射到多普勒域获得 $G(f_a)$;在获得 $S_0(\tau, f_a)$ 和 $G(f_a)$ 之后,通过式(9)进行幅度补偿;之后进行逆傅里叶变换到时域,获得的中间点即为补偿后的结果;最后一直循环这一过程,直到图像有效测绘区域

全部补偿完毕。

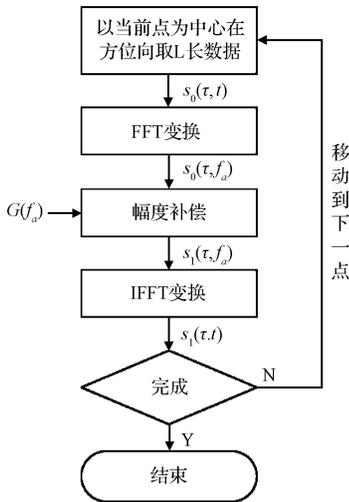


图 11 改进算法的处理流程

3.3 仿真分析

为验证改进方法的有效性,对 2.2 节中加入姿态变化的仿真数据用改进的方法进行处理,峰值法和积分法检验下的校准结果如图 12 所示。

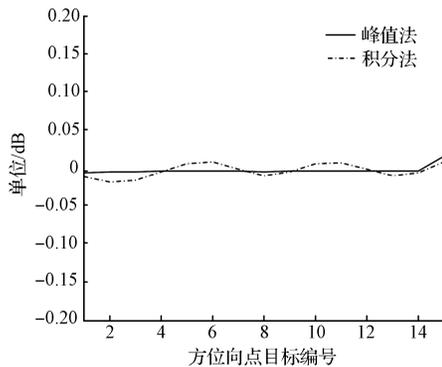


图 12 峰值法和积分法检验下的校准结果

对比图 8 和图 12 可知,传统的二维空变辐射校准方法和改进方法的积分法检验结果基本一致,但峰值法检验结果差异较大,传统方法经过峰值法检验得到的辐射精度只有 ± 1 dB,而改进算法得到的辐射精度可达 ± 0.05 dB,验证了改进方法的有效性。

如果进一步对比点目标的 IRW 和 PSLR 等 SAR 图像质量参数,改进方法和传统方法有明显的不同:改进的方法能够改善 IRW 和 PSLR,但传统方法不能,如图 13 所示的点目标分析结果对比。

通过对比图 13(a)和(b)可知,改进方法与传统方法相比 PSLR 提高了 8 dB,IRW 从 30%展宽提高到与理论值保持一致,验证了改进方法能够改善 PSLR 和 IRW 等质量参数,有利于提高 SAR 的图像质量^[13]。

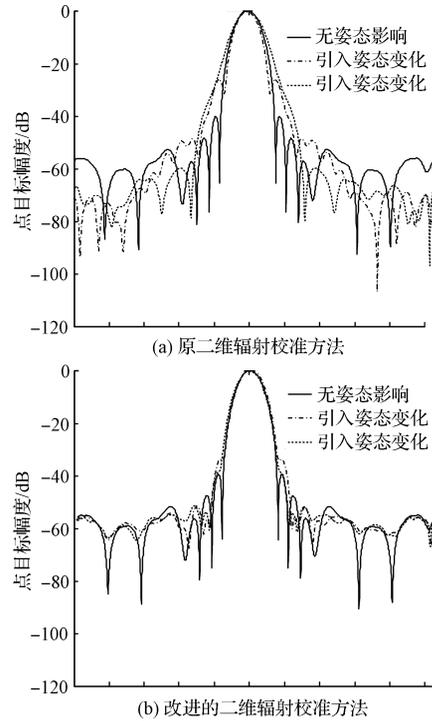


图 13 点目标分析结果对比

4 实测数据验证

采用中国科学院电子学研究所 X 波段 SAR 实测数据作为测试数据验证改进算法的有效性。由于数据采集过程中遭遇较为严重的气流扰动,载机平台的姿态变化较大。用改进方法校准前后的对比结果如图 14 所示。



(a) 二维辐射校准前



(b) 二维辐射校准后

图 14 实测数据处理结果对比

图 14(a) 由于受到较大的姿态变化影响, 在方位向出现了明显的明暗变化, 这一点和偏航角的变化直接相关。经过改进的二维辐射校准方法处理之后, SAR 图像整体的辐射强度均被校准, 如图 14(b)。实测数据处理结果对比验证了改进方法的有效性。

5 结论

二维辐射校准能够补偿 SAR 图像方位向的幅度不均衡, 这在载机平台姿态波动较大时尤为重要。常规的二维辐射校准方法仅从辐射能量的角度来校准 SAR 图像, 不能彻底补偿峰值功率误差, 无法改善 SAR 图像 IRW 不一致和 PSLR 变差等 SAR 图像质量参数。本文提出的改进的二维辐射校准方法能够弥补这些问题, 仿真分析和实测数据处理都验证了这一方法的有效性。但是该方法的一些操作会带来算法复杂度的提升, 有必要在今后的研究工作中进一步优化。

另外, 单从辐射校准的角度来看, 传统方法与改进方法对实测数据处理结果的对比结果差异不大, 需要在后续的实际应用中加以区别。

参考文献

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [2] 张晓, 仇晓兰, 仲利华, 等. 基于系统噪声抑制的 ScanSAR 辐射校正方法[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(6):40-44.
- [3] 乔寅骥, 肖健华, 黄银和, 等. 基于改进 RHT 的 SAR 图像机场区域提取算法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(2):56-60.
- [4] 朱贺, 李臣明, 张丽丽, 等. 联合灰度阈值分割及轮廓形态识别的河道提取[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(11):1288-1296.
- [5] 杨学志, 桂志强, 郑鑫, 等. 采用自适应块拼接的北极海冰 SAR 图像合成[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9):2070-2077.
- [6] JAGER M, REIGBER A, SCHEIBER R. Accurate consideration of sensor parameters in the calibration and focusing of F-SAR data synthetic aperture radar[C]. The European Conference on Synthetic Aperture Radar, Nuremberg, German, 2012: 3216-3220.
- [7] DE MACEDO K A C, SCHEIBER R. Precise topography- and aperture-dependent motion compensation for airborne SAR[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, 2(2):172-176.
- [8] CHAN Y K, KOO V C. An Introduction to Synthetic Aperture Radar(SAR)[J]. Process In Electromagnetics Research B, 2008, 2(3):629-635.
- [9] 袁礼海, 李钊, 葛家龙, 等. 利用点目标进行 SAR 辐射定标的方法研究[J]. 无线电工程, 2009, 39(1):25-28.
- [10] 郑晨, 黄磊, 陈权. 点目标的机载 SAR 辐射定标实验精度分析[J]. 遥感信息, 2015, 30(4):14-19.
- [11] 陈金星, 张波, 王超, 等. 高分辨率 SAR 辐射定标中两种角反射器响应测量方法的应用对比研究[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(4):677-683.
- [12] NI C, WANG Y F, XU X H, et al. SAR motion compensation based on the correction of residual attitude errors[J]. Science China Physics Mechanics & Astronomy, 2011, 54(54):1899-1905.
- [13] 刘锦帆, 徐浩煜, 梁兴东, 等. 基于 HVS 结构相似度的极化 SAR 图像质量评价方法[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(11):19-26.

作者简介

刘云龙, 1998 年出生, 男, 中国科学院电子学研究所 2014 级博士研究生, 主要研究方向为机载 SAR 精细化定标处理。

E-mail: liuyunlong_cau@163.com

周良将, 1981 年出生, 男, 工学博士, 中国科学院电子学研究所副研究员, 主要研究方向为合成孔径雷达系统设计与应用技术。

E-mail: ljzhou@mail.ie.ac.cn

李焱磊, 1983 年出生, 男, 工学博士, 中国科学院电子学研究所助理研究员, 主要研究方向为机载差分干涉 SAR 信号处理。

E-mail: yllee@mail.ie.ac.cn

梁兴东, 1973 年出生, 男, 工学博士, 中国科学院电子学研究所研究员, 主要研究方向为高分辨率合成孔径雷达系统、干涉合成孔径雷达系统、成像处理及应用和实时数字信号处理。

E-mail: xdliang@mail.ie.ac.cn