

S波段高分辨宽幅SAR辐射定标及误差分析方法

刘亚波* 刘霖 童智勇 喻忠军

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘要: 合成孔径雷达(SAR)系统的辐射定标可以构建SAR图像与地物后向散射截面(RCS)的关系, 反演目标物理特性, 满足SAR定量化遥感需求。相对于其它波段, S波段SAR的定量化遥感工作罕见报道。该文利用已知SAR及平台参数进行S波段SAR辐射定标处理, 首先推得了图像像素值与目标后向散射系数的关系, 接下来详细分析了各项误差对定标精度的影响, 给出了天线指向误差对定标精度影响的解析表达式。该文的分析有利于建立各参数与辐射定标精度的关系, 方便设计时候的误差分配。该文给出了草地、道路和平静水面的S波段后向散射截面统计值。最终实际数据处理结果表明, 该系统利用该定标方法可以在20°的视角范围内实现较高的绝对辐射精度。

关键词: 合成孔径雷达; S波段; 辐射定标; 误差分析; 后向散射截面

中图分类号: TN958.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)08-1946-06

DOI: 10.11999/JEIT180983

A Radiometric Calibration and Error Analysis Method for HWRS SAR at S-band

LIU Yabo LIU Lin TONG Zhiyong YU Zhongjun

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

Abstract: The radiometric calibration of Synthetic Aperture Radar (SAR) can establish a mapping relationship between SAR image and Radar Cross Section (RCS) of ground objects, which benefits the inversion of target physical properties, and further meets the needs of quantitative remote sensing. Compared with other wavebands, the reports about SAR works in S-band are rare. This paper focuses on the radiometric calibration of radar at S-band by using the known parameters of radar and plane. Firstly, the relationship between image pixel intensity and RCS of target is derived. Then, a detailed analysis on each error component is implemented, in which, the affection of antenna direction on radiometric calibration precision is given by the analytic expression. The analysis and simulation is propitious to error allocation during the design period. In addition, the mean RCS statistics of grass, road and calm water are given. The real data processing results show that a sufficient accuracy in 20° view angle can be achieved by using the radiometric calibration method.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); S-band; Radiometric calibration; Error analysis; Radar Cross Section (RCS)

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)系统的辐射定标可以构建SAR图像与目标后向散射信息的关系, 反演目标物理特性, 满足SAR定量化遥感需求。SAR定标分为内定标与外定

标^[1]。内定标主要通过固定设备注入定标信号到雷达数据流中, 以标定雷达系统性能, 测量雷达性能参数, 如信号幅相一致性、接收、发射功率和信号时延等, 国际上SAR系统内定标精度一般能够达到0.2 dB^[2]。外定标是指通过地面目标产生或反射的定标信号来标定雷达系统性能的过程, 这些地面目标可以是已知雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)的点目标, 也可以是大面积散射特征稳定的分布目标。通过比较地面已知目标的散射特性的理论真值与SAR测量值之间的差异, 标定系统参数。

星载SAR飞行较为平稳, 成像范围大, 以往的定标工作主要针对其开展研究, 文献[3-10]分别介

收稿日期: 2018-10-19; 改回日期: 2019-03-14; 网络出版: 2019-04-16

*通信作者: 刘亚波 ybliu@mail.ie.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61201405), 中国科学院青年创新促进会(2017170)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61201405), The Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (2017170)

绍了国内外的多颗SAR卫星的定标工作。近年来,大量高分辨机载SAR被研制成功,相对于星载SAR,其工作方式更为灵活,且可高时效地获取大量高质量地面目标图像,因此面向直接应用的定量化需求日益增长。由于机载SAR主要在对流层工作,平台轨迹和姿态不会很平稳,为了获取较大的观测区域图像,机载SAR的视角范围一般也较宽,这给机载SAR的定标工作带来了额外的影响因素。文献[11, 12]分别提出了国内高分辨X波段机载SAR的内外定标方法和毫米波雷达的内外定标方法。总体而言,相比星载SAR,机载SAR的定标研究较少,随着未来更多新体制机载SAR的研制成功,机载SAR定标工作将大量开展。本文针对S波段高分辨宽幅带SAR系统的外场定标展开研究,本文所提系统可搭载在各种机载平台上,分辨率可达0.5 m。采用有源相控阵天线,距离向波束宽度可达20°。现有的外场辐射定标及RCS反演方法[13, 14]主要基于各参数误差较为稳定的情况下,通过比较实际测得的RCS与理论值,得到定标常数,用于辐射校正。采用本文所提方法的原因主要是因为处理工作者往往得不到各个系统参数,因而不能通过雷达方程反演RCS。该方法虽简单有效,但不能建立起雷达及平台各因素与RCS的关系,进而不能分析各个因素对定标精度的影响。鉴于该S波段雷达各参数及平台飞行特性都已精确测得,本文利用已知的各雷达及平台参数反演目标后向散射系数并且分析误差产生原因。首先通过雷达方程导出了图像像素值与目标后向散射系数的关系。然后分析定标误差产生的原因,给出了定标误差公式,分析各因素对最终定标精度的影响,重点给出了天线指向误差对定标的影响。在实际数据的处理中,将测得的系统参数代入雷达方程,得到三面体角反射器的真实RCS。通过不同航过的数据处理,验证该系统可在20°的视角范围内实现较高的绝对辐射精度。最后,利用飞行获得的数据给出了草地、道路和平静水面的S波段RCS统计值,其中草地的RCS与文献[15]的基本一致,证明本文方法可以实现定量化遥感。

本文的结构安排如下:第2节首先给出了SAR目标辐射特性的计算公式,然后定量地分析了定标曲线误差来源,重点分析了天线指向误差对定标的影响。第3节开展了外定标精度试验,然后比较了三面体角反射器的理论真值与测量值,得到测量的系统定标常数,用不同航过的检验点进行检验,验证辐射定标的精度。第4节,给出了不同类型地物的RCS统计值。

2 目标辐射特性校正算法

高分辨SAR系统的接收机输出信号功率 P_r 可以写为

$$P_r = \frac{P_{av} \cdot G(\psi, \varphi)^2 \cdot \lambda^3 \cdot \delta R \cdot G_{ga} \cdot F_s}{2(4\pi R)^3 \cdot V_{st} \cdot \sin \theta} \sigma \quad (1)$$

其中, P_{av} 是发射平均功率, σ 是目标RCS, $G(\psi, \varphi)$ 是天线增益, 简单起见, 认为收发天线一致, ψ 和 φ 分别为距离向和方位向指向, λ 为波长, δR 为斜距采样单元, G_{ga} 是接收机增益, F_s 是采样频率, R 是斜距, V_{st} 是载机速度, θ 是该图像像素对应的下视角。图像像素强度与接收机功率关系为

$$DN^2 = K P_r G_{win} \quad (2)$$

其中, DN 是图像像素幅值, K 表示模拟信号与图像像素之间的比例关系, G_{win} 是处理加窗引起的增益损耗。由此可以建立出地面目标的RCS和图像强度 DN^2 之间的关系为

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{2(4\pi R)^3 \cdot V_{st} \cdot \sin \theta}{P_{av} \cdot G(\psi, \varphi)^2 \cdot \lambda^3 \cdot \delta R \cdot G_{ga} \cdot F_s} \frac{DN^2}{K \cdot G_{win}} \\ &= K_C \cdot R^3 \sin \theta D \cdot N^2 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, K_C 是系统定标常数。实际SAR系统存在在定标误差、天线方向图测量误差、指向误差、位置及速度测量等诸多误差源, 会导致图像测量的误差, 导致定量化应用的重复性差, 因此需要进一步分析各误差源对图像测量误差的影响。为了方便分析, 将式(3)转换为对数功率进行分析。

$$\begin{aligned} 10 \lg \sigma &= 10 \lg 128\pi^3 + 30 \lg R + 10 \lg V_{st} \\ &\quad + 10 \lg \sin \theta + 20 \lg DN + 10 \lg F_s \\ &\quad - 10 \lg P_{av} - 20 \lg G(\psi, \varphi) - 30 \lg \lambda \\ &\quad - 10 \lg \delta R - 10 \lg G_{ga} - 10 \lg K \end{aligned} \quad (4)$$

将式(4)中的变量 $\lg(\cdot)$ 作为自变量, 对其求全微分得

$$\begin{aligned} \Delta \sigma' &= 3\Delta R' + \Delta V_{st}' + \Delta \theta' + 2\Delta DN' \\ &\quad - \Delta P_{av}' - \Delta G_{ga}' + \frac{4\Delta \delta(\psi, \varphi)}{\ln 10 \cdot \delta(\psi, \varphi)} \\ &\quad - \frac{4\partial A(\psi, \varphi)}{\partial \psi} \frac{\Delta \psi}{\ln 10 \cdot A(\psi, \varphi)} \\ &\quad - \frac{4\partial A(\psi, \varphi)}{\partial \varphi} \frac{\Delta \varphi}{\ln 10 \cdot A(\psi, \varphi)} \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$G(\psi, \varphi) = \delta^2(\psi, \varphi) A^2(\psi, \varphi) \quad (6)$$

$\delta(\psi, \varphi)$ 是天线方向图的测量误差, 相当于在理想天线方向图 $A(\psi, \varphi)$ 上的微小扰动量, 第1行的 $\Delta(\cdot)' = \Delta \lg(\cdot) = \frac{\Delta(\cdot)}{(\cdot) \ln 10}$, $\Delta \sigma'$ 为分贝量纲。在以上误差中, P_{av} 和 G_{ga} 具有长期稳定性, 其测量值可

由内定标确定,目前国内外的内定标误差可以控制到0.2 dB以内。 ΔDN 受图像聚焦效果、背景影响和能量计算方法的影响,一般可以控制到0.5 dB以内^[10]。斜距 R 的误差主要来源于传感器延时和大气传输延时,一般通过内定标精确测得传感器延时,用简单的大气传输模型校正大气误差,其误差和定位精度在1个数量级,约为几十米以内,因此 $\Delta R'$ 项很小。 V_{st} 和 $\sin\theta$ 的精度主要由载机上的高精度惯导保证,目前高精度惯导的实时位置测量精度可达3 m,速度测量精度一般可达0.1 m/s,因此 $\Delta V_{\text{st}}'$ 和 $\Delta\theta'$ 项也很小。 $G(\psi, \varphi)$ 的误差主要来源于天线方向图测量误差 $\delta(\psi, \varphi)$ 和波束指向误差。 $\delta(\psi, \varphi)$ 一般在暗室内测量,法线附近通常较为准确,偏离法线方向越大,误差越大。波束指向误差可以在星载SAR中得到很好的约束,在机载中则受到天线安装精度,飞机测姿精度的影响。这两项为产生绝对辐射定标误差的主要来源。因此,需要通过外定标来校正这两部分的误差。

由于天线测量误差难以解析表示,因此主要分析天线指向误差带来的影响。分别以常见的sinc形和cosine形天线方向图为例分析。首先,sinc形天线方向图可以写为

$$A(\psi, \varphi) = A_{\text{max}} \cdot \text{Sa}(a\psi) \cdot \text{Sa}(b\varphi) \quad (7)$$

其中, A_{max} 为最大增益, $2\pi/a$ 和 $2\pi/b$ 分别为天线方向图的2维零点宽度。则式(5)中由于 ψ 和 φ 的误差引起的 $\Delta\sigma'$ 可以写为

$$\Delta\sigma'_{(\psi, \varphi)} = \frac{-4}{\ln 10} \left[\left(\frac{a^2 \cos(a\psi)}{\sin(a\psi)} - \frac{a}{\psi} \right) \Delta\psi + \left(\frac{b^2 \cos(b\varphi)}{\sin(b\varphi)} - \frac{b}{\varphi} \right) \Delta\varphi \right] \quad (8)$$

式(8)在 ψ 和 φ 的零点处无意义,但和方向图一样,零点处的极限存在,极限值为0,取其作为零点处的值。进一步分析可知,零点处为误差最小处,随着 ψ 和 φ 偏离法线方向,同样的误差会导致 $\Delta\sigma'_{(\psi, \varphi)}$ 更快地增加。sinc形天线方向图的主瓣宽度与 a 的关系为

$$\psi_{3 \text{ dB}} \approx \frac{\pi}{2a} \quad (9)$$

cosine形天线方向图可以写为

$$A(\psi, \varphi) = A_{\text{max}} \cos(a\psi) \cos(b\varphi) \quad (10)$$

则式(5)中由于 ψ 和 φ 的误差引起的 $\Delta\sigma'$ 可以写为

$$\Delta\sigma'_{(\psi, \varphi)} = \frac{4}{\ln 10} \left(a^2 \tan(a\psi) \Delta\psi + b^2 \tan(b\varphi) \Delta\varphi \right) \quad (11)$$

cosine形天线方向图的主瓣宽度与 a 的关系为

$$\psi_{3 \text{ dB}} = \frac{\pi}{3a} \quad (12)$$

从式(11)可知,cosine的天线方向图误差在法线方向为0,随着 ψ 和 φ 偏离法线方向,同样的误差会导致 $\Delta\sigma'_{(\psi, \varphi)}$ 更快地增加。sinc形天线方向图和cosine形天线方向图误差引起的 $\Delta\sigma'_{(\psi, \varphi)}$ 具有相类似的表现形式。

针对 $a=4, 8, 16$,也既是对应sinc形天线主瓣宽度为 $\frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{16}$ 和 $\frac{\pi}{32}$ 与cosine形天线主瓣宽度为 $\frac{\pi}{12}, \frac{\pi}{24}$ 和 $\frac{\pi}{48}$ 条件下,图1给出了sinc形天线方向图产生的误差系数(见式(8)),图2给出了cosine形天线方向图产生的误差系数(见式(11))。

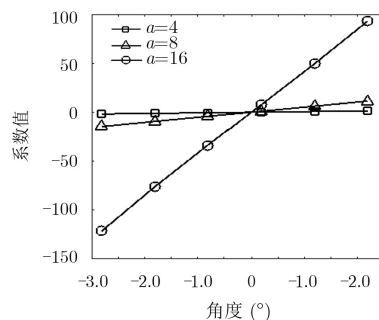


图1 sinc形天线方向图误差系数值与 a 的关系

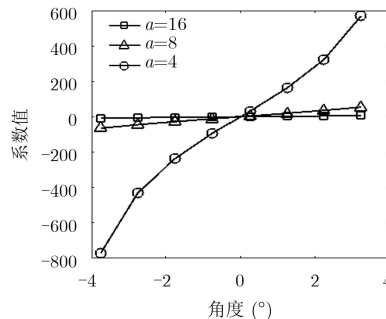


图2 cosine形天线方向图误差系数值与 a 的关系

图3和图4分别给出 $a=8$ 时,波束指向误差 $[0^\circ, 0.2^\circ, 0.4^\circ, 0.6^\circ, 0.8^\circ, 1.0^\circ]$ 条件下这两种形式的天线方向图对定标精度的影响。

从图1—图4可以得出如下结论:

(1)在同样的误差条件下,宽的主瓣比窄的主瓣产生的定标误差小。但是较宽的主瓣边缘处的测量误差往往较大,因此需要根据任务权衡;

(2)在同样的主瓣宽度下,误差将随着角度偏离法线方向而逐渐增大,在典型的 $a=8$ 时,1.0°的误差指向,sinc形天线方向图产生约0.55 dB的定标误差,cosine形天线方向图产生约3.5 dB的定标误差;

(3)在同样的条件下,cosine形天线方向图比sinc形天线方向图更容易产生大的定标误差。实际设计中,应以sinc形天线方向图为主。

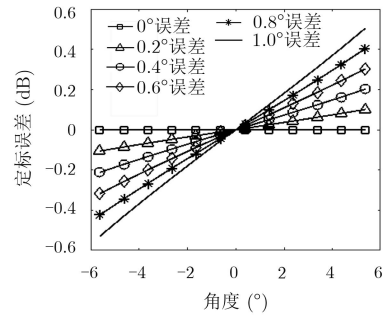


图 3 波束指向误差对sinc形天线方向图的影响

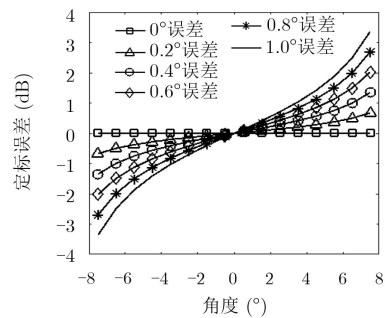


图 4 波束指向误差对cosine形天线方向图的影响

3 外定标实验

2018年4月至2018年5月，S波段雷达在山东开展了外定标飞行实验，该雷达的分辨率可达0.5 m，距离向视角范围设置在48°~70°，是一部单通道高分辨宽测绘带的雷达系统。与辐射定标有关的雷达和飞行参数如表1所示。

表 1 雷达及飞行参数表

参数	数值
平均功率(W)	19.2
距离范围(m)	3450~6250
视角范围(°)	48~70
采样频率(MHz)	400
波长(m)	0.09375
距离采样间隔(m)	0.375
接收机增益(dB)	67
飞机速度(m/s)	70

定标场选择在机场内的大片草坪内，共布设10个两两间隔400 m的三面体角反射器。三面体角反射器的边长为0.7 m，对应其理论RCS为20.59 dB。各个定标器的俯仰和方位指向已调整为与垂直航线位置的雷达指向重合，以消除角反射器自身的RCS变化引起的误差。图5给出了在Google earth上面标注的定标器位置图，图6是对应得到的SAR图像。

天线法向指向为60°，将表1参数代入式(3)可得各角度的定标常数 K_C 为123.84。利用该定标常数



图 5 Google earth定标场布设图



图 6 定标场成像结果

对同一航线，不同时间的两组飞行数据进行定标工作。首先选择一幅图像作为定标图像，获得由于式(5)中各因素误差导致的辐射校正曲线，然后选择不同时间另一航过的图像作为检验图像得到的三面角反射器RCS值如表2所示。可见利用各个已知的雷达及平台参数反演得出的三面体角反射器RCS值与理论值较为吻合，最大误差在0.7 dB之内。这为辐射定标提供了一种与系统各参数相关的思路，从而可以在设计阶段将误差因素考虑在内。对比定标图和检验图，二者的各个定标器RCS值均围绕理论值波动，说明系统具有较高的稳定性，可以用于量化遥感。为了进一步验证波束指向误差的影响，在进行天线方向图校正时设置了1°的误差，即校正用天线方向图法线设置为59°，从表2中可以看到，误差在两端较大，与理论值的误差接近2 dB，中间区域，误差影响较小。因而，在机载宽幅SAR的情况下，波束指向要尽量准确，以免影响绝对辐射定标精度。

4 实际地物测量结果

本节利用外场飞行的数据开展地物RCS测量的实验，图7(a)—图7(c)分别给出了用该S波段雷达得到的草地(图6)，跑道/光滑道路(图6)和平静水面的RCS值。由于该雷达尚处于试样阶段，获取地物种类和区域有限，因此图7(a)—图7(c)仅仅给出了初步测量的各个角度对应的RCS均值，作为本次实验的初步结果。图7(a)的RCS值与文献[15]给出的RCS均值基本一致，这表明该S波段雷达系统用本文方法可以得到真实的地物RCS。图7(b)和图7(c)给出了光滑路面和平静水面的RCS值，可以作为

表2 定标器RCS测量结果(dB)

	像素值		绝对辐射精度		
	定标图	检验图	定标图	检验图	1°误差图
T1	128.8	128.2	20.5	19.9	18.7
T2	128.4	128.4	20.1	20.0	19.0
T3	128.4	128.7	20.1	20.3	19.3
T4	128.9	129.3	20.6	21.0	20.1
T5	129.1	129.5	20.8	21.2	20.9
T6	129.1	129.4	20.8	21.0	21.4
T7	128.9	129.0	20.6	20.6	22.0
T8	128.6	128.6	20.3	20.2	21.9
T9	128.3	128.7	20.0	20.3	22.7
T10	128.3	128.6	20.0	20.2	22.4

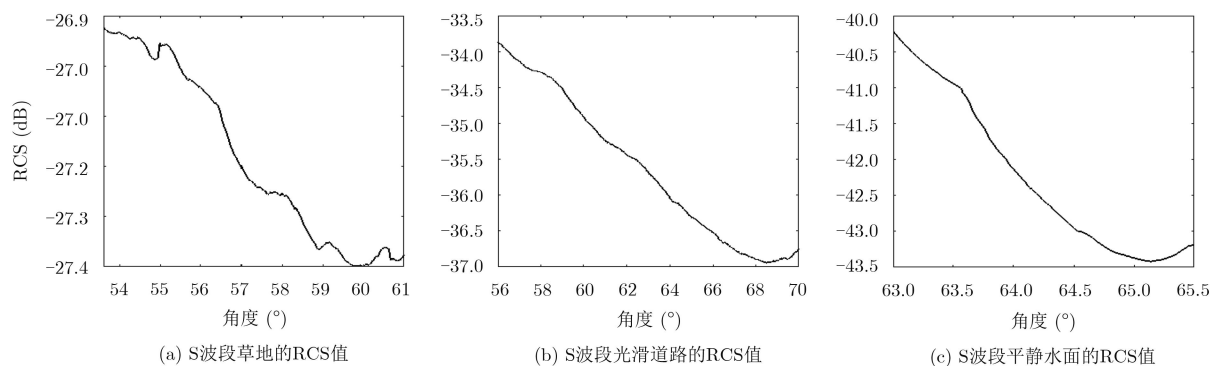


图7 S波段草地、光滑道路和平静水面的RCS值

S波段地物后向散射值使用。可以看到图7各个地物的RCS值随角度增大而减小。由于机场紧急迫降跑道还有一些其它地物, 受此影响, 图7(a)的RCS值随角度的变化不够平滑。

5 结束语

本文利用已知雷达及平台参数, 通过雷达方程进行S波段雷达辐射定标处理。本文定标方法可以分析各项误差对定标精度的影响, 有利于建立各参数与辐射定标精度的关系, 方便设计时候的误差分配。本文给出了天线指向误差对定标精度影响的解析表达式。最终实际数据的处理结果表明, 本文系统利用本文所提定标方法可以在20°的视角范围内实现较高的绝对辐射精度。本文初步给出了草地、道路和平静水面的S波段后向散射截面统计值, 未来将进一步完善该方面的工作。

参考文献

- [1] FREEMAN A. SAR calibration: An overview[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(6): 1107–1121. doi: [10.1109/36.193786](https://doi.org/10.1109/36.193786).
- [2] SCHWERDT M, HOUNAM D, ALVAREZ-PEREZ J L, et al. TerraSAR-X: Calibration concept of a multiple mode high resolution SAR[C]. The 25th International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005, Seoul, Korea, 2005: 4874–4877. doi: [10.1109/IGARSS.2005.1526766](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2005.1526766).
- [3] CHEN Quan, LI Zhen, ZHANG Ping, et al. A preliminary evaluation of the GaoFen-3 SAR radiation characteristics in land surface and compared with radarsat-2 and Sentinel-1A[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(7): 1040–1044. doi: [10.1109/LGRS.2018.2821238](https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2821238).
- [4] ZHANG Linjian, GAO Yesheng, WANG Kaizhi, et al. A subspace algorithm of calibrating channel gain and phase errors for HRWS SAR imaging[C]. 2017 IEEE Radar Conference, Seattle, USA, 2017: 269–272. doi: [10.1109/RADAR.2017.7944210](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944210).
- [5] LI Huimin, MOUCHE A, STOPA J E, et al. Calibration of the normalized Radar Cross Section for Sentinel-1 wave mode[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(3): 1415–1522. doi: [10.1109/TGRS.2018.2867035](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2867035).
- [6] GUCCIONE P, SCAGLIOLA M, and GIUDICI D. Low-frequency SAR radiometric calibration and antenna pattern estimation by using stable point targets[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(2): 635–646. doi: [10.1109/TGRS.2017.2752228](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2752228).

- [7] SCHMIDT K, RAMON N T, and SCHWERDT M. Radiometric accuracy and one-year-stability of sentinel-1A determined using point targets[C]. The 47th European Microwave Conference, Nuremberg, Germany, 2017: 1075–1078. doi: 10.23919/EuMC.2017.8231058.
- [8] SCHWERDT M, BRAUTIGAM B, BACHMANN M, *et al.* Final TerraSAR-X calibration results based on novel efficient methods[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 677–689. doi: 10.1109/TGRS.2009.2035308.
- [9] SCHWERDT M, BRAUTIGAM B, BACHMANN M, *et al.* TerraSAR-X calibration results[C]. 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, Germany, 2008: 1–4. doi: 10.1109/IGARSS.2008.4778963.
- [10] TOUZI R, HAWKINS R K, and COTO S. High-precision assessment and calibration of polarimetric RadarSAT-2 SAR using transponder measurements[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(1): 487–503. doi: 10.1109/TGRS.2012.2201946.
- [11] SHEN Ting, LI Jun, WANG Zhirui, *et al.* The airborne X-SAR calibration with high resolution[C]. 2016 CIE International Conference on Radar (RADAR), Guangzhou, China, 2017: 1–5. doi: 10.1109/RADAR.2016.8059209.
- [12] 汪伟, 李军, 胡庆荣. 基于点目标的机载毫米波SAR辐射定标[C]. 第三届高分辨率对地观测学术年会分会论文集, 北京, 2014: 502–513.
- [13] 周晓, 曾琪明, 焦健, 等. 星载SAR传感器外场定标实验研究—以TerraSAR-X卫星为例[J]. *遥感技术与应用*, 2014, 29(5): 711–718.
ZHOU Xiao, ZENG Qiming, JIAO Jian, *et al.* Research on Space-borne SAR field calibration experiment—A case study of TerraSAR-X field calibration[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014, 29(5): 711–718.
- [14] 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. doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2015.04.003.
ZHENG Chen, HUANG Lei, and CHEN Quan. Accuracy of airborne SAR radiometric calibration with point target[J]. *Remote Sensing Information*, 2015, 30(4): 14–19. doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2015.04.003.
- [15] ULABY F T and DOBSON M C. Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain[M]. Norwood, MA: Artech House, Inc., 1989: 173–177.
- 刘亚波: 男, 1984年生, 副研究员, 研究方向为合成孔径雷达系统仿真与信号处理.
- 刘 霖: 男, 1982年生, 副研究员, 研究方向为合成孔径雷达数字信号处理.
- 童智勇: 男, 1966年生, 研究员, 研究方向为机载合成孔径雷达系统设计.
- 喻忠军: 男, 1980年生, 研究员, 研究方向为机载合成孔径雷达系统设计.