

基于点目标实现环境减灾二号 06 卫星辐射定标和交叉定标

姚玉林, 韩启金, 徐兆鹏, 王爱春, 闫丽丽, 赵航

中国资源卫星应用中心, 北京 100094

摘要: 环境减灾二号 06 星于 2023 年 8 月 9 日成功发射, 与 2022 年 10 月 13 日成功发射的环境减灾二号 05 星组网运行。环境减灾二号 05/06 卫星是国家民用空间基础设施中的 S 波段合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 卫星。作为遥感业务星, 辐射定标是环境减灾二号 05/06 卫星量化应用的基础和前提。在轨测试期间, 在内蒙古苏尼特右旗定标场对环境减灾二号 06 星条带模式进行了辐射定标, 本文利用积分法对获取的数据进行绝对定标常数计算。为减小随机误差的影响, 对卫星各波位绝对定标常数进行了统一分析, 并利用亚马逊雨林入射角归一化的后向散射系数进行了检验。此外, 由于受到卫星重访周期和在轨测试时间的限制, 很难同时进行定标和验证, 本文提出了利用点目标进行环境减灾二号 05 星和 06 星交叉辐射定标的方法, 该方法的依据为卫星星座间相同波位进行观测时获取点目标的雷达散射截面差异可忽略, 通过提取卫星星座间点目标的能量差计算被定标卫星的绝对定标常数, 最后利用澳大利亚昆士兰州角反射器形成的点目标对交叉辐射定标方法进行了验证。结果表明, 基于积分法有效获取了环境减灾二号 06 星条带模式多个波位的绝对定标常数, 波位间绝对定标常数不超过 1.42 dB, 波位内绝对定标常数不超过 0.53 dB, 优于设计值 2.00 dB。利用环境减灾二号 05 星的绝对定标常数对环境减灾二号 06 星进行交叉定标, 单个波位精度优于 1.33 dB, 各波位交叉定标结果平均后, 与相同极化辐射定标的平均值相差 0.38 dB, 说明交叉辐射定标可作为补充手段对 SAR 外场定标结果进行验证, 并且随着频次的增加交叉辐射定标的结果趋于稳定, 各波位交叉定标结果取平均后, 随机误差明显减小。另外, 交叉辐射定标对保证卫星星座间 SAR 载荷辐射一致性具有重要意义。目前地面处理系统已将绝对定标常数更新, 为进一步的应用测试奠定了基础。

关键词: 环境减灾二号卫星 05 和 06 星, 辐射定标, 积分法, 交叉辐射定标, 点目标

中图分类号: P2

引用格式: 姚玉林, 韩启金, 徐兆鹏, 王爱春, 闫丽丽, 赵航. 2025. 基于点目标实现环境减灾二号 06 卫星辐射定标和交叉定标. 遥感学报, 29(11): 3327-3335

Yao Y L, Han Q J, Xu Z P, Wang A C, Yan L L and Zhao H. 2025. Radiometric calibration and cross calibration of HJ-2 06 satellite based on point targets. National Remote Sensing Bulletin, 29(11): 3327-3335 [DOI: 10.11834/jrs.20254171]

1 引言

2023 年 8 月 9 日环境减灾二号 06 星成功发射, 与 2022 年 10 月 13 日成功发射的环境减灾二号 05 星组网运行。环境减灾二号 05/06 星是《国家民用空间基础设施中长期发展规划 (2015—2025)》中的遥感业务卫星, 双星已组网运行, 轨道相位相差 180°, 对国土范围内 90% 以上区域重访周期优于 2.5 d, 对“一带一路”沿线国家和地区 90%

以上区域重访周期优于 2.0 d。双星均搭载了先进的 S 波段 SAR 载荷, 具备全天时、全天候、多极化对地成像能力, 将进一步提升 SAR 数据国产化率, 为应急管理和生态环境业务化应用提供基础保障, 并服务于国土资源、农业农村、水利、林草和地震等行业 (陈娟等, 2022)。

环境减灾二号 05/06 星主要由条带和窄幅扫描两种成像模式, 根据极化方式可分为单极化和双极化。条带模式标称分辨率为 5 m, 扫描模式分辨

收稿日期: 2024-05-10; 预印本: 2025-03-07

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2022YFB3903000, 2022YFB3903004)

第一作者简介: 姚玉林, 研究方向为 SAR 定标数据处理。E-mail: yylcresda@163.com

率为 25 m，具体模式见表 1 所示。条带模式共有 15 个波位（S1—S15），对应的波位号为 21—35。扫描模式与条带模式共用相同的 15 个波位（N1—N15）。

表 1 环境减灾二号 05/06 卫星主要工作模式及其参数

Table 1 Main modes and parameters of HJ-2 05/06 satellite

成像模式	分辨率/m			成像幅宽/km	
	标称值	方位向	距离向	标称值	范围
单极化条带	5	5	3.7—5.0	35	35—41
双极化条带	5	5	3.7—5.0	35	35—41
单极化扫描	25	20—25	16.5—24.5	95	95—109
双极化扫描	25	20—25	16.5—24.5	95	95—109

辐射定标是环境减灾二号 05/06 星定量化应用的基础，通过辐射定标才能将 SAR 图像与地物的后向散射系数建立函数关系（Freeman，1992），研制要求 SAR 图像的绝对辐射精度优于 2.00 dB。

精确的 SAR 辐射定标发射前很难实现，必须经过在轨测试定标的过程，在轨测试定标一般分两步：

（1）通过大范围均匀地区实现相对辐射校正，对距离向天线方向图的指向进行标定，校正距离向实测方向图与天线方向图模型之间的差异，保证了图像的相对辐射精度。

（2）利用已知雷达散射截面积 RCS（Radar Cross Section）的点目标进行绝对辐射定标。在场地布设已知 RCS 的角反射器或有源定标器来获取绝对定标常数。

SAR 辐射定标初期通过建立端到端的传递函数，将图像数值转换为雷达后向散射系数值（Larson 等，1988），Dobson 等（1986）提取了 SIR-B 卫星的绝对定标常数，辐射定标的精度根据雷达系统参数的不确定性来估计（Kasischke 等，1989）。上述辐射定标均使用角反射器冲激响应的峰值像素值来计算，Gray 等（1990）将其统称为峰值法，但是峰值法受到聚焦和信噪比的影响，于是进一步提出了积分法。积分法比峰值法稳定，可靠性更高，已被广泛应用于 Sentinel-1、RISAT-1 等 SAR 卫星（Schmidt 等，2017；Mishra 等，2015）。TerraSAR-X 卫星相对辐射精度设计值为 0.68 dB，绝对定标精度设计值为 1.10 dB，经过在轨测试，相对辐射精度达到 0.30 dB，绝对辐射精度达到了

0.60 dB（Schwerdt 等，2010；Breit 等，2010）。Sentinel-1B 卫星相对辐射精度为 0.25 dB，干涉宽幅模式绝对辐射精度为 0.36 dB（ 1σ ），Sentinel-1A 卫星和 Sentinel-1B 卫星交叉验证的结果为 0.38 dB（ 1σ ）（Schwerdt 等，2017）。RISAT-1 卫星的 FRS-1 模式（Fine Resolution Stripmap mode-1）HH 极化绝对定标常数标准差最大为 0.55 dB，最小为 0.36 dB，MRS 模式（Medium Resolution ScanSAR mode）标准差为 0.53 dB（Gupta 等，2019；Mishra 等，2015；Upadhayay 等，2016）。ALOS 卫星 PALSAR 载荷的绝对辐射精度为 0.76 dB（Shimada 等，2007，2009）。

国产 SAR 卫星辐射定标受卫星重访和定标周期的限制，一般选择一定数量的波位进行。Huang 等（2023）利用 1 m C-SAR 01 卫星超精细条带模式和精细条带 1 模式进行了辐射定标，但只覆盖了 2 个波位，样本偏少，且未考虑随机误差的影响，随机误差严重影响辐射定标的精度，最大接近 1.00 dB（Schwerdt 等，2010，2018；Breit 等，2010）。高分三号卫星是中国第一颗民用高分辨率多极化 SAR 卫星，其绝对辐射精度设计值为 1.50 dB，在轨测试结果为 1.30—1.40 dB（张庆君，2017）。

为减小随机误差的影响，本文对辐射定标各波位进行了统一分析，针对环境减灾二号 06 星辐射定标受到卫星重访周期的限制，进一步提出了利用点目标进行交叉辐射定标的方法，同类型星座选取相同的点目标进行观测，通过提取两次点目标的能量差异计算被定标卫星的绝对定标常数。通过环境减灾二号 05/06 星交叉定标的探索和验证，以期为 SAR 卫星辐射定标和验证提供重要参考。

2 环境减灾二号 06 星辐射定标方法

为了获取环境减灾二号 06 星的绝对定标常数，地面提供 RCS 精确已知的目标作为标准参考源来测量。此外，为了降低背景对参考目标的影响，定标场应选择背景散射系数较低的区域。通过布设已知精确 RCS 的角反射器作为参考目标，同时考虑背景杂波的影响进行 SAR 系统传递函数测量。当 SAR 卫星过顶后，对定标场的原始数据进行成像处理生成 SAR 标准产品，在标准复图像产品中

提取点目标, 根据点目标的二维脉冲函数测量绝对定标常数。

2.1 绝对辐射定标

SAR地面处理系统一般是线性的, 将处理器增益、接收机的增益控制衰减等值等在SAR成像及标准产品生成的过程中进行校正, 在满足信号杂波比SCR (Signal to Clutter Ratio) 的条件下忽略背景影响, 绝对定标常数计算公式如下 (Freeman, 1992):

$$K = \frac{P_p A}{\sigma_p} \quad (1)$$

式中, K 为绝对定标常数, P_p 为点目标的接收能量, A 为地距平面的单元面积, σ_p 为已知角反射器的雷达截面积。

将式(1)转化为分贝形式如下:

$$K_{dB} = 10 \log_{10} P_p + 10 \log_{10} A - 10 \log_{10} \sigma_p \quad (2)$$

式中, K_{dB} 为绝对定标常数的分贝形式。

通过角反射器形成点目标的能量、角反射器的RCS和地距平面的单元面积, 即可求出绝对定标常数。所以计算绝对定标常数的详细步骤如下:

(1) 地距平面的单元面积可通过下式计算 (Huang等, 2023)。

$$A = \delta_a \delta_r / \sin \theta \quad (3)$$

式中, A 为地距平面的单元面积, δ_a 和 δ_r 分别代表方位向和斜距向的采样间隔, θ 代表本地的入射角。

(2) 角反射器的RCS (欧乃铭等, 2013) 计算公式如下:

$$\sigma_p = \frac{4\pi l^4}{3\lambda^2} \quad (4)$$

式中, σ_p 为已知角反射器的雷达截面积, l 代表角反射器直角边的边长, λ 为SAR载荷的工作波长。

(3) 采用积分法计算点目标的能量, 如图1所示。以三面角反射器在SAR图像中形成的点目标为中心, 利用后向散射系数较低的灰色区域作为背景杂波, 计算方法见式(5)。选取两倍分辨率的像元能量作为点目标的主瓣能量, 计算方法见式(6) (Huang等, 2023)。

$$P_{background} = \frac{N_A}{N_B} \sum_{i \in B} DN^2 \quad (5)$$

$$P_{main} = \sum_{i \in A} DN^2 \quad (6)$$

式中, $P_{background}$ 为背景杂波的能量, DN 为点目标像元幅度值, N_A 为主瓣能量积分区域的像元个数, N_B 为背景区域对应的像元个数, i 为像元序号, P_{main} 为包含背景杂波能量的点目标主瓣能量。则杂波能量校正后的点目标能量计算公式为

$$P_p = (P_{main} - P_{background}) \quad (7)$$

式中, P_p 为杂波能量校正后的点目标能量, P_{main} 为包含背景杂波能量的点目标主瓣能量, $P_{background}$ 为背景杂波的能量。结合式(2)—(4)和(7)即可得到绝对定标常数。

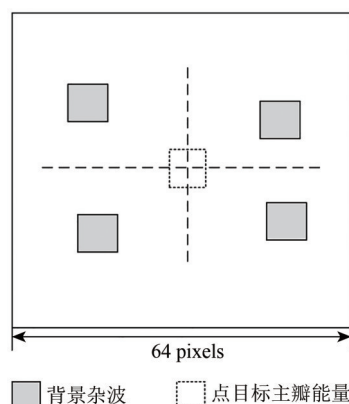


图1 点目标主瓣能量区域和背景区域定义

Fig. 1 Definition of main lobe energy area of point target and background areas

(4) 由于地物杂波会影响SAR辐射定标的精度, 将点目标的信号杂波比 >20.00 dB作为计算绝对定标常数的筛选条件 (Huang等, 2023), 信杂比的公式见式(8)。

$$SCR = 10 \log_{10} \frac{P_{main}}{P_{background}} \quad (8)$$

式中, SCR 为点目标的信杂比, P_{main} 为包含背景杂波能量的点目标主瓣能量, $P_{background}$ 为背景杂波的能量。

利用获得的绝对定标常数计算目标的后向散射系数值, 为便于SAR图像存储, 实际L1A级标准复图像产品被量化到 ± 32767 , 而其量化前的最大值被保存在产品元信息文件中, 所以实际中目标的后向散射系数可表示为

$$\sigma_{dB}^0 = 10 \log_{10} \left(\frac{QV}{32767} \right)^2 + 10 \log_{10} P - K_{dB} \quad (9)$$

式中, σ_{dB}^0 为目标的后向散射系数, QV 为SAR图像量化前的最大值, P 为目标的能量, K_{dB} 为绝对定标常数的分贝形式。

2.2 交叉辐射定标

由于在轨测试时间受限和卫星重访的限制, 定标场的数据获取次数有限, 为保证绝对定标常数的精度, 本文提出利用点目标实现交叉辐射定标。绝对辐射定标利用已知 RCS 的点目标来求取绝对定标常数, 而进行交叉辐射定标时需要点目标的 RCS 近似一致, 并不需要提前获取点目标的 RCS 值。将角反射器作为交叉辐射定标的点目标, 角反射器的 RCS 随方位角和俯仰角的变化而变化(翁寅侃等, 2015)。方位角主要受卫星轨道倾角和角反射器所处纬度的影响, 角反射器的方位角计算公式(Ye等, 2004)为

$$\alpha = \arcsin\left(\pm \frac{\cos i}{\cos \beta}\right) \quad (10)$$

式中, α 为方位角, i 为卫星轨道倾角, β 为角反射器所处纬度值, 当卫星星座内轨道倾角一致, 卫星星座对相同点目标进行观测时方位角对点目标 RCS 的影响一致。

角反射器的俯仰角由卫星波束入射角决定, 理论上采用相同的波位拍摄时, 两卫星获取点目标的 RCS 相等, 但星座内卫星高度略有差异, 导致卫星入射角存在差异。使用 FEKO 软件进行仿真, 采用环境减灾二号 06 星中心频率 3.2 GHz, 边长取 1.5 m, 入射角在 20—49° 变化 0.5° 时, 雷达散射截面积的变化小于 0.3 dB。相同波位入射角一般变化小于 0.3°, 所以由卫星高度差引起入射角的差异可忽略。

基于上述理论, 本文提出了一种基于点目标实现交叉辐射定标的方法, 卫星星座中的不同卫星对点目标使用相同的波位观测并进行交叉辐射定标, 由于背景杂波未知, 将点目标的信杂比大于 20.00 dB 作为筛选条件, 具体步骤如下所示:

(1) 将卫星星座内一颗已标定 SAR 卫星的绝对定标常数 K 作为参考。

(2) 卫星星座内的不同卫星对选定的点目标区域进行观测。已标定 SAR 卫星和待标定 SAR 卫星以相同升降轨、相同视角对选定的点目标区域进行成像。

(3) 对两卫星获取的原始数据进行处理, 得到两卫星的单视复图像, 从已标定卫星的标准单视复图像中, 根据几何位置找到点目标, 选取指定的窗口, 进行 N 倍插值, N 取 16、32 等, 精确提取点目标的能量 P_{m1} , 判断信杂比是否大于 20.00 dB,

满足条件则计算点目标的雷达散射截面积 σ_m 为

$$\sigma_m = P_{m1} - K \quad (11)$$

式中, σ_m 为第 m 个点目标的雷达散射截面积, P_{m1} 为已标定卫星第 m 个点目标的能量, K 为已标定卫星的绝对定标常数, 依次提取区域内点目标的能量, 得到相应点目标的雷达截面积。

(4) 从待标定卫星的复图像中找到相同的点目标, 选取与步骤 (3) 相同大小的窗口, 进行相同倍数插值, 精确获取点目标的能量 P_{m2} , 判断信杂比 SCR 是否 > 20.00 dB, 依次提取区域内点目标的能量, 再利用获得点目标的 RCS 计算待标定 SAR 卫星的绝对定标常数, 公式为

$$K_{out} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n (P_{m2} - \sigma_m) \quad (12)$$

式中, K_{out} 为待标定 SAR 卫星的绝对定标常数, σ_m 为第 m 个点目标的雷达散射截面积, P_{m2} 为待标定卫星第 m 个点目标的能量, n 为点目标的个数。

3 试验与结果

3.1 定标设备及布设情况

环境减灾二号 06 星在内蒙古自治区苏尼特右旗进行定标, 场地地势平坦。定标场布设 6 台三角角反射器, 角反射器直角边长为 1.849 m, 根据环境减灾二号 06 星 SAR 中心频率 3.2 GHz, 利用式 (4) 得到 RCS 为 37.46 dBm²。定标场角反射器在内蒙古苏尼特右旗的分布见图 2。

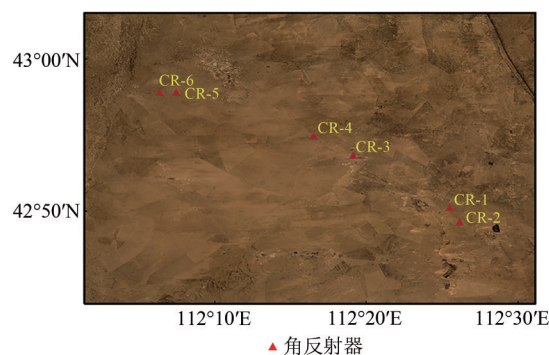


图2 内蒙古自治区苏尼特右旗定标场角反射器分布
Fig. 2 Distribution of corner reflectors in Suniteyouqi, Inner Mongolia

澳大利亚昆士兰州共布设 40 个角反射器 (Garthwaite, 2015; Gisinger 等, 2021), 环境减灾二号 05/06 星交叉辐射定标使用其中 20 个角反射器进行试验, 分布如图 3 所示。

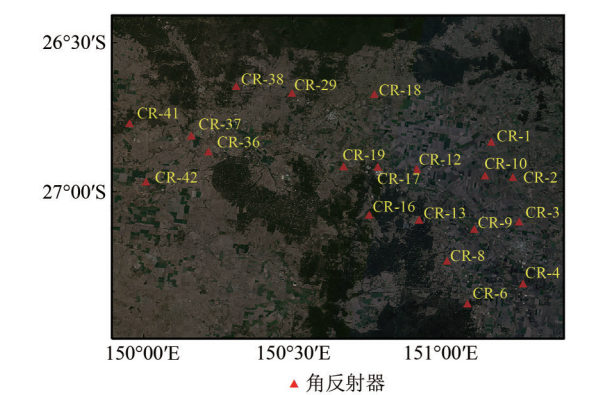


图 3 澳大利亚昆士兰州角反射器分布情况
Fig. 3 Corner reflectors distribution in Queensland, Australia

3.2 定标数据获取情况

环境减灾二号 06 星定标场数据的情况见表 2。本研究共获取 11 次外场定标数据。

表 2 环境减灾二号 06 星定标数据统计
Table 2 Radiometric calibration data of HJ-2 06 satellite

波位	日期	极化方式
S1	2023-11-05	VV
S2	2023-10-24	VV
S6	2023-10-24	VV
S7	2023-10-20	HH
S8	2023-11-06	VV
S11	2023-10-16	HH
S11	2023-10-27	VV
S13	2023-10-12	HH
S15	2023-10-14	HH
S15	2023-12-01	HH
S15	2023-11-01	VV

注：VV 代表垂直发射垂直接收；HH 代表水平发射水平接收。

澳大利亚昆士兰州交叉定标的获取情况见表 3 所示，共进行 9 次交叉辐射定标，极化方式为 HH。

3.3 环境减灾二号 06 星卫星辐射定标

环境减灾二号 06 星利用积分法获取的绝对定标常数见表 4 所示，所有被覆盖的角反射器均用于相应极化绝对定标常数的计算，共获取 8 个波位不同极化的绝对定标常数。从表 4 可知 HH 极化不同波位之间的最大差异为 1.42 dB（S15HH 和 S13HH 之间），VV 极化不同波位之间的最大差异为 1.21 dB（S8VV 和 S6VV 之间）。波位 S15 和 S11 对 HH 极化和 VV 极化都进行了观测，HH 极化绝对定标常数

略大于 VV 极化绝对定标常数。对子带内进行分析，S15 波位 HH 极化绝对定标常数离均值最大偏差为 0.53 dB。

表 3 交叉定标获取数据列表
Table 3 Data list of cross calibration

序号	波位	卫星	时间
1	S1	环境减灾二号 05 星	2023-06-16
		环境减灾二号 06 星	2024-02-16
2	S12	环境减灾二号 05 星	2023-08-12
		环境减灾二号 06 星	2024-01-27
3	S13	环境减灾二号 05 星	2023-07-05
		环境减灾二号 06 星	2023-11-15
4	S14	环境减灾二号 05 星	2023-07-24
		环境减灾二号 06 星	2024-04-01
5	S14	环境减灾二号 05 星	2023-07-29
		环境减灾二号 06 星	2023-10-25
6	S15	环境减灾二号 05 星	2023-06-24
		环境减灾二号 06 星	2023-12-18
7	S15	环境减灾二号 05 星	2023-06-15
		环境减灾二号 06 星	2023-11-27
8	S15	环境减灾二号 05 星	2023-06-30
		环境减灾二号 06 星	2023-11-19
9	S15	环境减灾二号 05 星	2023-06-20
		环境减灾二号 06 星	2024-01-22

表 4 环境减灾二号 06 星不同波位的绝对定标常数
Table 4 Calibration constant of different beams of HJ-2 06 satellite

波位	极化方式	绝对定标常数平均值/dB	标准差
S7	HH	20.44	0.07
S11	HH	20.80	0.25
S13	HH	20.21	0.04
S15	HH	21.63	0.36
S1	VV	20.59	0.00
S2	VV	20.53	0.10
S6	VV	19.98	0.07
S8	VV	21.19	0.18
S11	VV	20.39	0.05
S15	VV	21.05	0.10
HH 极化绝对定标常数		20.87	0.60
VV 极化绝对定标常数		20.64	0.43

注：VV 代表垂直发射垂直接收；HH 代表水平发射水平接收。

不同波位的方向图和不同波束间的增益差异在标准产品生产过程中进行了补偿，绝对辐射定

标不依赖于波位，将所有绝对定标常数的平均值按极化区分作为未定标波位的绝对定标常数。HH极化绝对定标常数的平均值为 20.87 dB，标准差为 0.60 dB，VV 极化绝对定标常数的平均值为 20.64 dB，标准差为 0.43 dB。环境减灾二号 05/06 卫星上内定标的精度约为 0.60 dB，相对辐射精度优于 0.90 dB，所以绝对辐射精度优于 1.50 dB，与波位间绝对定标常数最大差异 1.42 dB 吻合。TerrSAR-X 卫星 S002、S007 和 S013 波位的绝对定标常数区间为 $[-57.3, -55.9]$ ，平均值为 -56.58 dB，标准差为 0.31 dB，星上内定标的精度优于 0.20 dB，相对辐射校正的精度优于 0.30 dB，所以绝对辐射精度优于 0.60 dB (Schwerdt 等, 2010)。环境减灾二号 06 星的绝对辐射精度低于 TerrSAR-X 卫星，原因主要在于星上内定标的精度和相对辐射精度。

辐射定标要求点目标的信杂比 >20.00 dB，外场辐射定标中所有点目标信杂比的结果见表 5 示，满足要求。

表 5 不同角反射器下辐射定标信杂比的测定结果
Table 5 SCR results of radiometric calibration

角反射器	信杂比 最大值/dB	信杂比 最小值/dB	信杂比 平均值/dB
CR-1	48.19	36.57	43.34
CR-2	46.04	38.63	43.57
CR-3	45.20	41.02	43.70
CR-4	45.56	42.19	43.88
CR-5	47.06	38.95	43.00
CR-6	45.85	38.54	42.19

利用获取的绝对定标常数计算亚马逊雨林入射角归一化的后向散射系数 γ_0 ，见表 6 所示。从表 6 可知，S 波段 VV 极化的 γ_0 均值为 -6.18 dB，标准差为 0.82 dB，与 C 波段 VV 极化 γ_0 值为 -6.5 dB 两者接近 (Shimada 等, 2009)。为保障环境减灾二号 06 星的辐射精度和稳定性，将定期对亚马逊雨林进行观测。

3.4 环境减灾二号 06 星与 05 星交叉验证

以环境减灾二号卫星 05 星为参考对环境减灾二号卫星 06 星进行交叉辐射定标，两颗卫星使用相同的波位、降轨对澳大利亚定标场的角反射器区域进行成像。根据所提交叉辐射定标方法，计

算点目标信杂比结果见表 7 所示，信杂比均满足 >20.00 dB 的条件。

表 6 亚马逊雨林测得的入射角归一化后向散射系数
Table 6 Gamma naught from amazon rainforest

波位	极化	绝对定标常数/dB	入射角归一化 后向散射系数/dB
S1	VV	20.59	-6.83
S2	VV	20.53	-6.96
S3	VV	20.64	-5.18
S4	VV	20.64	-5.67
S5	VV	20.64	-6.29
S6	VV	19.98	-7.29
S7	VV	20.64	-6.39
S8	VV	21.19	-7.44
S9	VV	20.64	-5.82
S10	VV	20.64	-6.24
S11	VV	20.39	-7.37
S12	VV	20.64	-5.24
S13	VV	20.64	-5.08
S14	VV	20.64	-5.15
S15	VV	21.05	-5.76
平均值			-6.18
标准差			0.82

注：VV 代表垂直发射垂直接收。

交叉辐射定标得到的绝对定标常数见表 8。表中绝对定标常数值来源于表 4。由表 8 可见：环境减灾二号 06 星交叉辐射定标与绝对辐射定标差值最大为 S13 波位，两者相差 1.33 dB，最小为 S15 波位，两者相差 0.29 dB；S14 波位进行了 2 次交叉辐射定标，S15 波位进行了 4 次交叉辐射定标，两者交叉辐射定标与绝对辐射定标的差值均 <0.50 dB，优于单次交叉辐射定标的结果。各波位交叉辐射定标的平均值为 21.25 dB，与 HH 极化绝对定标常数平均值 20.87 dB 相比，差异为 0.38 dB。由此得出，通过点目标交叉辐射定标能够对 SAR 外场定标的结果进行有效验证，并且随着交叉定标频次的增加，定标的结果越趋于一致。后续交叉辐射定标将作为 SAR 外场定标的补充手段，通过继续增加交叉辐射定标的频次，进一步减小绝对定标常数异常值的影响，提高环境减灾二号 06 卫星绝对定标常数的稳定性，保障 SAR 卫星长期的辐射一致性。

表 7 交叉辐射定标信杂比的结果
Table 7 SCR results of cross calibration

角反射器	信杂比 最大值/dB	信杂比 最小值/dB	信杂比 平均值/dB
CR-1	36.95	27.54	32.25
CR-2	31.49	22.87	27.18
CR-3	39.76	30.29	36.82
CR-4	31.30	25.06	28.18
CR-6	33.98	28.65	31.51
CR-8	36.90	28.83	32.23
CR-9	35.39	26.54	32.87
CR-10	30.19	24.77	27.48
CR-12	29.54	25.55	27.54
CR-13	32.61	32.31	32.46
CR-16	30.21	29.35	29.78
CR-17	29.85	29.72	29.78
CR-18	29.02	28.50	28.76
CR-19	31.52	29.89	30.71
CR-29	31.61	28.03	29.82
CR-36	30.67	25.28	27.43
CR-37	28.35	21.81	24.71
CR-38	26.37	25.25	25.81
CR-41	26.33	21.77	24.04
CR-42	31.65	30.53	31.09

表 8 交叉定标结果
Table 8 Result of cross calibration

波位	交叉定标 平均值/dB	交叉定标 标准差/dB	辐射定标 常数/dB	交叉定标与 辐射定标差值/dB
S1	21.70	0.49	20.87	-0.83
S12	21.79	0.10	20.87	-0.92
S13	21.54	0.48	20.21	-1.33
S14	20.50	0.85	20.87	0.37
S15	21.34	0.61	21.63	0.29
各波位 平均值	21.25	0.76	20.87	-0.38

4 结 论

为减小随机误差对辐射定标的影响，本研究以环境减灾二号 06 星为研究对象，对各波位绝对定标常数进行了统一分析，同时考虑到辐射定标受到卫星重访周期长的限制，进一步提出了利用点目标进行交叉辐射定标的方法，同类型星座选取相同的点目标进行观测，通过提取两次点目标

的能量差异计算被定标卫星的绝对定标常数，并以澳大利亚布设角反射器形成的点目标进行了验证。主要结论如下：

(1) 环境减灾二号 06 星波位间绝对定标常数不超过 1.42 dB，波位内绝对定标常数不超过 0.53 dB，优于设计指标 2.00 dB。

(2) 在标准产品生产的过程中，系统对不同波位间方向图的差异、不同波束间的增益和处理器增益等进行补偿，所以绝对辐射定标不依赖波位，因此环境减灾二号 06 星采用所有绝对定标常数的平均值作为未定标波位的绝对定标常数，HH 极化绝对定标常数的平均值为 20.87 dB，标准差为 0.60 dB，VV 极化绝对定标常数的平均值为 20.64 dB，标准差为 0.43 dB。经亚马逊热带雨林的验证，VV 极化的入射角归一化的后向散射系数值为 -6.18 dB，标准差为 0.82 dB，与 C 波段的参考值 -6.50 dB 接近。

(3) 利用点目标实现了环境减灾二号 05 星和环境减灾二号 06 星交叉辐射定标，单个波位精度优于 1.33 dB，各波位交叉辐射定标结果平均后，与辐射定标获取的 HH 极化绝对定标常数平均值相比，差异为 0.38 dB。说明交叉辐射定标可作为补充手段对 SAR 外场定标结果进行验证，并且随着交叉定标频次的增加，结果趋于稳定，各波位交叉定标结果进行平均进一步了减小随机误差的影响，同时交叉辐射定标对保证卫星星座间 SAR 载荷辐射一致性具有显著作用。

环境减灾二号 06 星已完成绝对辐射定标，并且绝对定标常数已加入到地面处理系统，为卫星的应用测试提供了有力保障。由于在轨测试周期短，测试的条带模式波位有限，后续将利用现有条件持续对环境减灾二号 05/06 星的辐射性能进行跟踪。

参考文献(Reference)

Breit H, Fritz T, Balss U, Lachaise M, Niedermeier A and Vonavka M. 2010. TerraSAR-X SAR processing and products. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48(2): 727-740 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2035497]
Chen J, Wang G L, Wang D, Zhu Y L, Mei M X, Wang S L and Jia S L. 2022. An overview of HJ-2-05 satellite. Space International, (12): 33-36 (陈娟, 王国良, 王迪, 朱雅琳, 梅名宣, 王帅雷, 贾松

- 霖. 2022. 环境减灾二号 05 卫星概览. 国际太空, (12): 33-36 [DOI: 10.3969/j.issn.1009-2366.2022.12.008]
- Dobson M C, Ulaby F T, Brunfeldt D R and Held D N. 1986. External calibration of SIR-B imagery with area-extended and point targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-24(4): 453-461 [DOI: 10.1109/TGRS.1986.289659]
- Freeman A. 1992. SAR calibration: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(6): 1107-1121 [DOI: 10.1109/36.193786]
- Garthwaite M C, Hazelwood M, Nancarrow S, Hislop A and Dawson J H. 2015. A regional geodetic network to monitor ground surface response to resource extraction in the northern Surat Basin, Queensland. *Australian Journal of Earth Sciences*, 62(4): 469-477 [DOI: 10.1080/08120099.2015.1040073]
- Gisinger C, Schubert A, Breit H, Garthwaite M, Balss U, Willberg M, Small D, Eineder M and Miranda N. 2021. In-depth verification of sentinel-1 and TerraSAR-X geolocation accuracy using the Australian corner reflector array. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(2): 1154-1181 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2961248]
- Gray A L, Vachon P W, Livingstone C E and Lukowski T I. 1990. Synthetic aperture radar calibration using reference reflectors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(3): 374-383 [DOI: 10.1109/36.54363]
- Gupta M, Malhotra V, Shah B, Prakash S, Sharma A and Kartikeyan B. 2019. RISAT-1 SAR HRS mode data quality evaluation//Proceedings of the IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama: IEEE: 1041-1044 [DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8898129]
- Huang Q Q, Zhang F L, Li L, Liu X C, Jiao Y N, Yuan X Z and Li H R. 2023. Quick quality assessment and radiometric calibration of C-SAR/01 satellite using flexible automatic corner reflector. *Remote Sensing*, 15(1): 104 [DOI: 10.3390/rs15010104]
- Kasischke E S and Fowler G W. 1989. A statistical approach for determining radiometric precisions and accuracies in the calibration of synthetic aperture radar imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27(4): 416-427 [DOI: 10.1109/36.29561]
- Larson R W, Jackson P L and Kasischke E S. 1988. A digital calibration method for synthetic aperture radar systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26(6): 753-763 [DOI: 10.1109/36.7707]
- Mishra M D, Patel P, Srivastava H, Shukla A, Patel P R and Shukla A K. 2015. Approach for absolute radiometric calibration of Risat-1 sar data using standard target. *International Journal of Remote Sensing and Geoscience (IJRSG)*, 4(1): 28-32
- Ou N M, Bai M, Liang B and Miao J G. 2013. Application of the trihedral corner reflector in RCS calibration test. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 39(2): 220-224 (欧乃铭, 白明, 梁彬, 苗俊刚. 2013. 三角板角反射器在 RCS 定标测试中的应用. 北京航空航天大学学报, 39(2): 220-224) [DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2013.02.005]
- Schwerdt M, Brautigam B, Bachmann M, Doring B, Schrank D and Gonzalez J H. 2010. Final TerraSAR-X calibration results based on novel efficient methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(2): 677-689 [DOI: 10.1109/TGRS. 2009. 2035308]
- Schwerdt M, Schmidt K, Klenk P, Tous Ramon N, Rudolf D, Raab S, Weidenhaupt K, Reimann J and Zink M. 2018. Radiometric Performance of the TerraSAR-X Mission over More Than Ten Years of Operation. *Remote Sensing*, 10(5): 754 [DOI: 10.3390/rs10050754]
- Schwerdt M, Schmidt K, Tous Ramon N, Klenk P, Yague-Martinez N, Prats-Iraola P, Zink M and Geudtner D. 2017. Independent system calibration of Sentinel-1B. *Remote Sensing*, 9(6): 511 [DOI: 10.3390/rs9060511]
- Shimada M, Isoguchi O, Tadono T, Higuchi R and Isono K. 2007. Palsar calibration and validation. *The Journal of Space Technology and Science*, 23(1): 1_36-1_42 [DOI: 10.11230/jsts.23.1_36]
- Shimada M, Isoguchi O, Tadono T and Isono K. 2009. PALSAR radiometric and geometric calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(12): 3915-3932 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2023909]
- Upadhayay S, Rani B A, Pandey S, Mishra N, Patra S K and Chowdhury S. 2016. Radiometric correction of RISAT-1 data//Proceedings of 2016 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP). Melmaruvathur: IEEE: 86-90 [DOI: 10.1109/ICCSP.2016.7754452]
- Weng Y K, Li S, Yang J L, Yi H, Wang H and Ma Y. 2015. Fast solution to the RCS of corner reflector for the SAR radiometric calibration. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 40(11): 1551-1556 (翁寅佩, 李松, 杨晋陵, 易洪, 王虹, 马跃. 2015. SAR 辐射定标中角反射器 RCS 的快速求解. 武汉大学学报(信息科学版), 40(11): 1551-1556) [DOI: 10.13203/j.whugis20130613]
- Ye X, Kaufmann H and Guo X F. 2004. Landslide monitoring in the Three Gorges area using D-InSAR and corner reflectors. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(10): 1167-1172 [DOI: 10.14358/PERS.70.10.1167]
- Zhang Q J. 2017. System design and key technologies of the GF-3 satellite. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(3): 269-277 (张庆君. 2017. 高分三号卫星总体设计与关键技术. 测绘学报, 46(3): 269-277) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170049]

Radiometric calibration and cross calibration of HJ-2 06 satellite based on point targets

YAO Yulin, HAN Qijin, XU Zhaopeng, WANG Aichun, YAN Lili, ZHAO Hang

China Centre for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China

Abstract: The HJ-2 06 satellite was successfully launched on August 9, 2023, and forms a coordinated earth observation system with its twin satellite HJ-2 05. As important components of China's civil space infrastructure, these S-band synthetic aperture radar (SAR) satellites enable critical quantitative applications, such as soil moisture monitoring and ocean current observation. Radiometric calibration is the fundamental prerequisite for these applications because it establishes the precise functional relationship between SAR images and target backscatter coefficients. The HJ-2 06 satellite aims to achieve an absolute radiometric calibration accuracy of 2.00 dB through radiometric calibration.

In this study, the radiometric calibration method of the HJ-2 06 satellite was introduced. Compared with the peak method, the integral method demonstrated superior stability and was thus adopted to derive the calibration constants for different beams of the HJ-2 06 satellite. To reduce the influence of random errors, absolute calibration constants of all beams were uniformly analyzed. The results were further validated using incidence normalized backscatter coefficients from the Amazon rainforest, a benchmark for other SAR satellites. During the on-orbit testing period of the HJ-2 06 satellite, absolute radiometric calibration of the strip mode was performed at Suniteyouqi, Inner Mongolia. Operational constraints, including limited revisit cycles and on-orbit testing duration, make simultaneous calibration and validation particularly challenging. To overcome this limitation, we proposed an innovative cross calibration technique that utilizes point targets as references between HJ-2 05 and HJ-2 06 satellites. The basis of the method is that the change of the radar cross section of point targets can be ignored when observed by the same beams between satellite constellations. The absolute calibration constants of the calibrated satellite were calculated by extracting the energy difference of point targets between satellite constellations. Cross radiometric calibration using corner reflectors as point targets was completed in Queensland, Australia.

Experiment results showed that the differences in the absolute calibration constant among the beams of the HJ-2 06 satellite are not more than 1.42 dB, and the calibration constants within the beams remain within 0.53 dB, surpassing the design specifications. Furthermore, the cross radiometric calibration accuracy of single beam between HJ-2 05 and HJ-2 06 satellites is better than 1.33 dB. The difference between the average results of cross calibration and the average results of radiometric calibration was 0.38 dB, demonstrating excellent radiometric consistency within the satellite constellation.

Comprehensive calibration constants were successfully derived for different operational beams of the HJ-2 06 satellite, and the findings showed that cross radiometric calibration on the basis of point targets can serve as a supplementary means to verify the results of SAR field calibration, indicating that the results of cross radiometric calibration tend to stabilize with increasing frequency. By averaging the cross calibration results of all beams, the random error is effectively reduced. Cross radiometric calibration plays a pivotal role in ensuring the consistency of SAR payload radiation between satellite constellations. The derived absolute calibration constants were successfully implemented in the HJ-2 06 satellite's ground processing system, establishing a robust foundation for subsequent application verification and operational deployment.

Key words: HJ-2 05/06 satellites, radiometric calibration, integral method, cross radiometric calibration, point targets

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB3903000, 2022YFB3903004)