

## Ku 波段旋转扫描扇形波束散射计地面扩展目标在轨定标

朱金台<sup>\*①②</sup> 董晓龙<sup>①</sup> 林文明<sup>③</sup> 朱迪<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院空间科学与应用研究中心中国科学院微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

<sup>③</sup>(Institut de Ciències del Mar (ICM-CSIC) Barcelona 08003)

**摘要:** 旋转扫描扇形波束散射计(Rotating Fan-beam SCATterometer, RFSCAT)是一种新体制的海洋风场测量雷达散射计。RFSCAT 对同一观测面元能够提供更多的方位角和入射角观测组合,改善海面风矢量场的反演精度。为了达到设计的风场反演精度,系统要求定标精度为 0.5 dB。该文基于中法海洋卫星(Chinese French Oceanography SATellite, CFOSAT)雷达散射计的系统参数,考虑了在轨测量的主要误差源,分析了地面扩展目标在轨外定标的特点,给出了可行的 RFSCAT 在轨外定标方法,并利用仿真数据对该方法进行验证。利用 QuikSCAT 散射计的 L2A 数据和图像重构(SIR)数据,针对地球表面归一化雷达后向散射系数( $\sigma^0$ )稳定的区域,给出了定标地图,为 RFSCAT 在轨定标提供参考。

**关键词:** 雷达散射计; 旋转扇形波束散射计; Ku 波段; 在轨定标; 地面扩展目标

中图分类号: TP732.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)08-1793-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01591

## Calibration of the Ku-band Rotating Fan-beam Scatterometer Using Land Extended-area Targets

Zhu Jin-tai<sup>\*①②</sup> Dong Xiao-long<sup>①</sup> Lin Wen-ming<sup>③</sup> Zhu Di<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(The CAS Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

<sup>③</sup>(Institute of Marine Sciences (ICM-CSIC), Barcelona 08003, Spain)

**Abstract:** Rotating Fan-beam SCATterometer (RFSCAT) is a new radar scatterometer system for ocean surface vector wind measurement. Compared with other available scatterometers, RFSCAT can provide more combination of azimuth and incidence angles for a single surface resolution cell. To achieve the required wind vector accuracy, radar scatterometry measurement of backscattering coefficient ( $\sigma^0$ ) must be calibrated within a few tenths of a decibel. In this paper, the method for external calibration of RFSCAT is proposed, based on the system parameters of the scatterometer onboard the Chinese French Oceanography SATellite (CFOSAT), and is verified by simulations. Then QuikSCAT L2A data and SIR of several large homogenous areas are analyzed to check the stability and azimuthal dependence of the  $\sigma^0$  over these areas. A new calibration mask is generated and will be used as a reference for the calibration of RFSCAT.

**Key words:** Radar scatterometer; Rotating Fan-beam SCATterometer (RFSCAT); Ku-band; Onboard calibration; Land extended-area targets

### 1 引言

星载雷达散射计通过测量海洋表面的后向散射系数提供全球海面风场数据。迄今已经发射的星载雷达散射计分为固定扇形波束散射计(包括 SEASAT/SASS, ADEOS-1/NSCAT, ERS/ESCAT,

METOP/ASCAT 等)和旋转扫描笔形波束散射计(包括 QuikSCAT/SeaWinds, Oceansat-2/SCAT, HY-2/SCAT 等)两种类型。旋转扫描扇形波束散射计(RFSCAT)是一种新体制散射计,具有观测角组合多、观测刈幅宽等特点,能在短时间内对全球进行覆盖并提供高精度的海洋风场数据。计划于 2014 年发射的中法海洋卫星(CFOSAT)将搭载国际上首个 RFSCAT。

2012-12-07 收到, 2013-03-01 改回

国家自然科学基金(41006109)资助课题

\*通信作者: 朱金台 jintai.hust@gmail.com

为了达到 RFSCAT 设计的 $\pm 2$  m/s 风速精度和 $\pm 20^\circ$  风向精度的风产品精度要求, 需要对 $\sigma^0$  精确定标(达到 0.5 dB 的定标精度)<sup>[1]</sup>。这样的定标精度很难单纯依靠发射前定标实现, 需要在卫星发射后对散射计进行在轨外定标<sup>[2]</sup>。因此雷达散射计的在轨定标是雷达散射计实现精确测量的重要过程之一, 也是雷达散射计在轨测试和运行的重要环节。雷达散射计的在轨定标可采用 3 种方法: (1) 利用地面扩展目标进行定标<sup>[2,3]</sup>; (2) 利用地面定标站(包括应答机)定标<sup>[2,4]</sup>; (3) 利用典型海区进行定标<sup>[5]</sup>。SASS 采用亚马逊热带雨林进行在轨外定标<sup>[2]</sup>, ESCAT 首次采用热带雨林和定标站两种定标方法<sup>[2]</sup>, ASCAT 首次采用以上 3 种定标方法进行在轨定标<sup>[3,4,6]</sup>。CFOSAT 雷达散射计在轨定标的主要目的包括: (1) 测量和确认天线旋转过程中旋转关节插入损耗的波动量; (2) 测量和确认天线增益方向图, 特别是俯仰向天线增益方向图<sup>[7]</sup>。本文主要介绍利用地面扩展目标实现对 RFSCAT 的在轨定标。

本文第 2 节主要介绍 CFOSAT/SCAT 的背景以及 $\sigma^0$  测量误差; 第 3 节对 RFSCAT 地面扩展外定标进行了分析并给出了可行的定标方法; 第 4 节基于地面扩展外定标原理和要求, 对定标地图和定标时间窗口的合理选取进行了研究; 最后给出了仿真结果及结论。

## 2 星载 RFSCAT 测量误差源

### 2.1 中法海洋卫星散射计(CFOSAT/SCAT)

中法海洋卫星散射计(CFOSAT/SCAT)将是世界上首个在轨运行的星载旋转扫描扇形波束散射计。该散射计采用 Ku 波段(中心频率 13.256 GHz), VV 和 HH 双极化 RFSCAT 体制<sup>[1,8]</sup>。图 1 显示了该体制散射计的观测几何示意图, 在方位向采用波束分辨、在俯仰向采用距离分辨。其观测入射角范围为 $23^\circ$ – $51^\circ$ , 较大的最大入射角使得该体制散射计具有较大刈幅。随着卫星的运动, 散射计在旋转扫描过程中能够对同一观测面元以不同方位角和不同入射角多次观测, 获得比以往星载雷达散射计较多的不同观测角组合。另外基于脉冲压缩的距离分辨和方位向较低的转动速度可获得较多的独立观测样本, 有利于改善扇形波束天线增益较低对风场反演的影响, 并提高风场反演的精度。

### 2.2 RFSCAT 测量误差源

雷达散射计发射一个脉冲信号然后接收地面反射的回波功率 $\hat{P}_R$ , 该回波功率由回波信号功率和热噪声功率两部分组成。通常需要设计专门的测量通道测量噪声功率 $\hat{P}_N$ , 用总回波功率减去噪声功率,

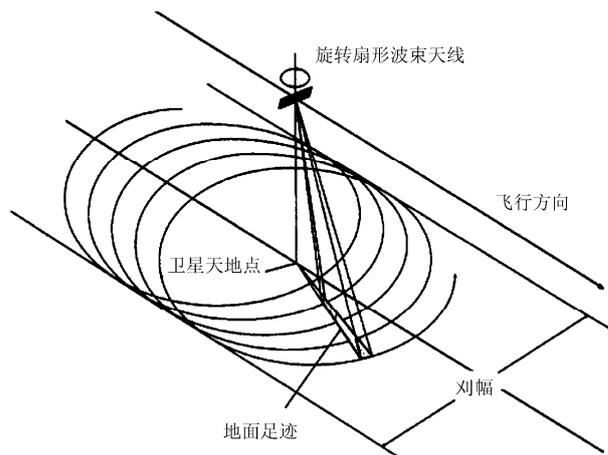


图1 RFSCAT 观测示意图

得到回波信号功率的无偏估计 $\hat{P}_S$ , 即 $\hat{P}_S = \hat{P}_R - \hat{P}_N$ 。然后通过雷达方程得到测量的 $\hat{\sigma}_{\text{meas}}^0$ ,

$$\hat{\sigma}_{\text{meas}}^0 = \hat{P}_S / X \quad (1)$$

其中 $X$ 为定标因子, 表达式如式(2)<sup>[2]</sup>:

$$X = \frac{\lambda^2 P_t}{(4\pi)^3 L} \int \frac{G^2(x) F(x)}{R^4(x)} dx \quad (2)$$

式中 $\lambda$ 是发射脉冲波长,  $P_t$ 为天线发射功率,  $L$ 为系统损耗, 包括传输路径大气损耗、天线到发射机/接收机信道损耗等,  $x$ 表示足迹范围内的散射点的位置,  $G(x)$ 为散射点的天线增益方向图,  $F(x)$ 为散射计系统的滤波器响应,  $R(x)$ 表示散射计到各散射点的斜距, 积分项为目标单元的等效面积。

通常将 $\sigma^0$  测量误差用归一化标准差的形式表示( $K_p$ ), 其中 $\text{var}[\sigma^0]$ 表示 $\sigma^0$ 的方差,  $\varepsilon[\sigma^0]$ 表示 $\sigma^0$ 的均值<sup>[2]</sup>:

$$K_p = \frac{\sqrt{\text{var}[\sigma^0]}}{\varepsilon[\sigma^0]} \quad (3)$$

$K_p$ 主要来自回波能量误差和定标因子计算误差。前者称为传递误差 $K_{pc}$ , 由雷达固有的衰落效应和接收机热噪声引起, 是回波信噪比和测量独立样本数的函数<sup>[2]</sup>; 后者称为定标误差 $K_{pr}$ , 来源于雷达方程中定标因子 $X$ 误差和从原始数据计算回波信号功率的误差。影响 $K_{pr}$ 的因素主要包括天线增益、接收机增益、系统损耗及发射功率的影响, 这些都需要在地面进行发射前定标并在数据处理中进行补偿; 而大气损耗及天线旋转关节的插入损耗补偿后的残余则无法通过发射前的定标消除; 天线增益方向图也需要进行在轨测量, 确认其发射后的变化情况。另外, 卫星的姿态误差也会影响定标误差。定标的目标就是尽量减小定标误差 $K_{pr}$ 。

### 3 RFSCAT 地面扩展目标外定标

#### 3.1 RFSCAT 定标模型

RFSCAT 的外定标包括天线方向图的定标和天线转动机构旋转关节插入损耗波动造成的测量误差的定标。加性误差项对回波信号测量通道  $\hat{P}_R$  和噪声测量通道  $\hat{P}_N$  的影响是一致的, 在得到回波信号功率  $\hat{P}_S$  时消除。因此对测量误差建模时采用乘性误差模型(即对数域的加性误差模型)。 $\sigma^0$  的测量值  $\hat{\sigma}_{\text{meas}}^0$  由地面目标真实后向散射系数  $\sigma_{tr}^0$ , 天线增益以及其它不能由内定标环路、也不能在地面精确测量的系统增益引起的误差  $\Delta\sigma_G^0$ , 以及热噪声误差  $\Delta\sigma_n^0$  等组成<sup>[2]</sup>。

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{\text{meas}}^0(L_n, b_n, \theta_n, t_n, \text{Asc/Des}) \\ = \sigma_{tr}^0(L_n, \theta_n, t_n, \text{Asc/Des}) + \Delta\sigma_G^0(L_n, b_n, \theta_n, \\ t_n, \text{Asc/Des}) + \Delta\sigma_n^0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $L_n$  为地面目标位置,  $t_n$  为测量时刻,  $b_n$  为不同天线波束, Asc/Des 表示散射计进行升轨或降轨测量,  $\theta_n$  表示地面上不同距离向分辨条带对应的测量入射角。

外定标分析通常选取一组很大的样本进行分析、平均处理, 因此式(4)中误差  $\Delta\sigma_n^0$  可以忽略。散射计系统增益引起的误差  $\Delta\sigma_G^0$  通常分解为绝对偏差  $\Delta\sigma_{\text{abs}}^0$  和相对偏差  $\Delta\sigma_r^0$ 。对于任何波束和信号处理信道及每一个分辨单元,  $\Delta\sigma_{\text{abs}}^0$  都是相同的, 主要对风速的反演带来误差; 而相对偏差  $\Delta\sigma_r^0$  则表示不同波束以及不同信道间的相对误差。对于 RFSCAT,  $\Delta\sigma_r^0$  主要是由天线旋转关节插入损耗波动随波束方位角变化造成, 主要对风向反演带来误差。

由于无法精确得到地面定标目标的  $\sigma_{tr}^0$ , 很难区分  $\sigma_{tr}^0$  和  $\Delta\sigma_{\text{abs}}^0$ , 导致无法利用地面扩展目标在轨定标消除  $\Delta\sigma_{\text{abs}}^0$ , 因而结合  $\sigma_{tr}^0$  与  $\Delta\sigma_{\text{abs}}^0$ , 用等效后向散射系数  $\Delta\sigma_{\text{eff}}^0$  表示。卫星升轨、降轨时, 由于过境时日照条件以及地面目标的水汽含量不同影响地面目标的  $\sigma^0$ 。我们选取合适的定标区域及合理的定标窗口并把升轨和降轨数据分开处理则可以把式(4)简化为

$$\hat{\sigma}_{\text{meas}}^0(b_n, \theta_n) = \sigma_{\text{eff}}^0(\theta_n) + \Delta\sigma_r^0(b_n, \theta_n) \quad (5)$$

根据 Skouson 和 Long<sup>[2,10]</sup>的研究结果, 测量的  $\hat{\sigma}_{\text{meas}}^0$  可以采用四阶多项式拟合。为了考察旋转关节插入损耗在不同方位角下的偏差量, 把天线旋转  $360^\circ$  等分为 24 个方位区间。

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{\text{meas}}^0(k, \theta_n) = c(0, k) + c(1, k)\theta_n + c(2, k)\theta_n^2 \\ + c(3, k)\theta_n^3 + c(4, k)\theta_n^4 \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $k = 1, 2, \dots, 24$ , 表示方位区间的序号。同理,

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{eff}}^0(k, \theta_n) = c_{\text{eff}}(0, k) + c_{\text{eff}}(1, k)\theta_n + c_{\text{eff}}(2, k)\theta_n^2 \\ + c_{\text{eff}}(3, k)\theta_n^3 + c_{\text{eff}}(4, k)\theta_n^4 \\ \Delta\sigma_r^0(k, \theta) = c_r(0, k) + c_r(1, k)\theta_n + c_r(2, k)\theta_n^2 \\ + c_r(3, k)\theta_n^3 + c_r(4, k)\theta_n^4 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

得到拟合系数公式为

$$c(i, k) = c_{\text{eff}}(i, k) + c_r(i, k) \quad (8)$$

其中  $i = 0, \dots, 4$ , 表示多项式系数的序号。

为了得到不同方位角之间  $\sigma^0$  的相对偏差, 我们选取其中一个方位角的  $\sigma^0$  或者平均后向散射系数当做参考系, 即  $\Delta\sigma_r^0(b_{\text{ref}}, \theta_n) = 0$ , 式(8)减去参考系表示为

$$\Delta c(i, k) \approx c_r(i, k) \quad (9)$$

可以用最小二乘法、加权最小二乘法等对系数  $c_r(i, k)$  进行估计, 从而得到系数  $\Delta c(i, k)$ , 则各方位区间相对于参考区间测量值的校正偏差  $\sigma_{\text{cor}}^0(k, \theta_n)$  为

$$\sigma_{\text{cor}}^0(k, \theta_n) = \sum_{i=0}^4 \Delta c(i, k) \cdot \theta_n^i \quad (10)$$

测量得到的原始数据减去该定标校正偏差量即可达到天线旋转过程中测量的一致性, 消除天线转动机构旋转关节插入损耗波动造成的影响。

#### 3.2 天线增益方向图定标

当天线发生物理形变或遇到空间温度变化引起型面及馈电结构的变化时, 会导致天线方向图发生变化。方位向天线方向图偏差用 3.1 节中定标方法进行消除。俯仰向天线方向图, 只是入射角的函数, 考虑在了绝对误差项  $\Delta\sigma_{\text{abs}}^0$  中, 从  $\Delta\sigma_{\text{abs}}^0$  提取出天线方向图误差  $G_p(\theta_n)$  后, 式(5)表示为

$$\hat{\sigma}_{\text{meas}}^0(b_n, \theta_n) = \sigma_{\text{eff}}^0(\theta_n) + G_p(\theta_n) + \Delta\sigma_r^0(b_n, \theta_n) \quad (11)$$

在不同方位向上进行平均得到( $\langle \cdot \rangle$ 表示对相应物理量的平均):

$$G_p(\theta_n) = \langle \hat{\sigma}_{\text{meas}}^0(b_n, \theta_n) - \sigma_{\text{eff}}^0(\theta_n) - \Delta\sigma_r^0(b_n, \theta_n) \rangle \quad (12)$$

通过该方法可以实现对散射计天线方向图, 特别是俯仰向天线方向图的在轨监测和定标, 消除因天线方向图变化带来的误差。

## 4 定标地图及定标时间窗口选取

#### 4.1 定标地图选取

已有的研究表明, 热带雨林、冰盖、沙漠等能够用来作为星载散射计的定标目标<sup>[10]</sup>。为了保证对散射计地面足迹覆盖, 要求其定标区域大于其波束照射到的地面足迹。在这里主要考察亚马逊热带雨林、格陵兰岛冰盖和南极冰盖区域。

地球存在着大面积的冰盖且冰盖  $\sigma^0$  比较稳定, 被用来作为 SAR 的定标目标。利用 QuikSCAT VV 极化 2009 年 SIR 图像得到了格陵兰岛和南极冰盖的

年均  $\sigma^0$  以及标准差, 如图 2 所示。格陵兰岛中部和北部区域均为干雪区域, 地势平坦, 雪积累较多且随季节融化较少, 散射特性比较稳定, 从图 2(b)中可以看出, 该区域的标准差较小, 被选作定标目标进行研究。南极岛东部高原区域面积较大, 坡度起伏较小,  $\sigma^0$  随方位向调制较弱, 选作定标目标进行研究<sup>[11]</sup>。冰盖的各向异性主要是由于风对雪的侵蚀以及雪的累积效应<sup>[11]</sup>, 因此分别选取格陵兰岛和南极地势平坦、 $\sigma^0$  标准差较小区域的 5 个区域, 位置如表 1 所示, 利用 QuikSCAT 2002 年 JD296-JD2983 天 L2A 数据对冰盖  $\sigma^0$  随方位向的调制情况进行分析。

每个观测点取经纬度  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  面积, 借用海洋散射理论, 建立二阶傅里叶级数模型对方位向进行

调制( $\phi_i$  表示方位角), 如式(13)所示:

$$\begin{aligned} \sigma^0(\text{dB}) &= I_0 + M_1 \cos(\phi_i + \varphi_1) + M_2 \cos(2\phi_i + \varphi_2) \\ &= I_0 + \sum_{k=1}^N [I_k \cos k\phi_i + Q_k \sin k\phi_i] \end{aligned} \quad (13)$$

式中  $\varphi_i = \arctan(-Q_i/I_i)$ ,  $M_i = \sqrt{I_i^2 + Q_i^2}$  表示  $\sigma^0$  对方位向的调制幅度。得到如表 2 和表 3 所示的调制结果, 从表的  $M_1$  和  $M_2$  值中可以看出, 格陵兰岛东北部部分区域  $\sigma^0$  随方位向变化较小, 能够用来当做定标目标, 但该区域面积较小无法做到对 RFSCAT 所有入射角的覆盖, 不适合用来对 RFSCAT 进行定标, 可以用来对 SeaWinds, HY-2 等笔形波束散射计进行定标。而南极冰盖各向同性的区域太小, 不适合当做散射计的定标目标。

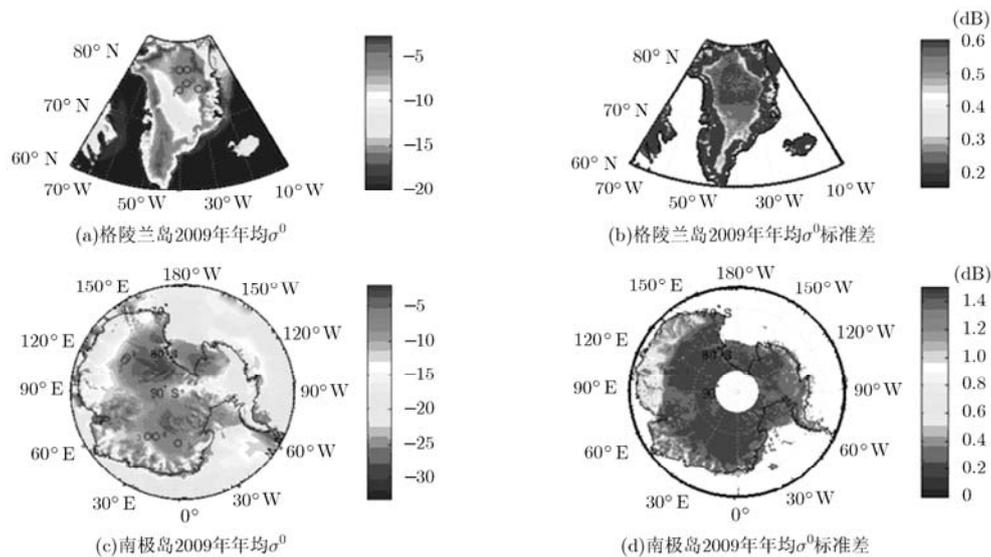


图 2 格陵兰岛与南极冰盖

表 1 格陵兰岛和南极岛考察区域

	1	2	3	4	5
格陵兰岛	(40° W, 75° N)	(40° W, 78° N)	(30° W, 75° N)	(35° W, 78° N)	(36° W, 76° N)
南极	(75° S, 123° E)	(75° S, 120° E)	(77° S, 37° E)	(78° S, 30° E)	(78° S, 5° E)

表 2 QuikSCAT 观测数据的傅里叶拟合系数, HH 极化(格陵兰岛)

	$I_0$	$I_1$	$Q_1$	$M_1$	$I_2$	$Q_2$	$M_2$
1	-7.322	0.0057	0.0228	0.0235	-0.0453	-0.0506	0.0679
2	-5.812	0.1335	0.1210	0.1802	0.0356	0.0276	0.0450
3	-6.923	0.0031	0.0890	0.0890	-0.0597	0.0027	0.0597
4	-5.885	0.0977	-0.0360	0.1041	-0.1093	-0.0246	0.1120
5	-6.188	0.1126	0.0133	0.1134	0.0654	0.0814	0.1044

表 3 QuikSCAT 观测数据的傅里叶拟合系数, HH 极化(南极)

	$I_0$	$I_1$	$Q_1$	$M_1$	$I_2$	$Q_2$	$M_2$
1	-7.357	-0.1198	-0.0337	0.1244	0.0360	-0.0435	0.0565
2	-7.647	0.1275	0.1371	0.1872	-0.0654	0.0005	0.0654
3	-8.743	0.1961	-0.1885	0.2720	0.0145	-0.0923	0.0934
4	-8.041	-0.1797	-0.1158	0.2138	0.0107	-0.1053	0.1058
5	-7.150	-0.1015	0.0213	0.1037	0.0246	-0.0404	0.0473

亚马逊雨林的  $\sigma^0$  比较稳定, 但近年来雨林出现了一定程度的人为破坏而导致在边缘出现了不同程度退化, 从图 3(a) 雨林 2003 年和 2009 年的 SIR 数据对比中也可以看出。2003 年和 2009 年雨林年均  $\sigma^0$  如表 4 所示。对于同一极化方式, 升轨测量的  $\sigma^0$  比降轨测量的要大约 0.6 dB, 这可能因为升降轨的日照条件以及水汽的垂直传输不同造成的。对于相同轨道条件, VV 极化比 HH 极化的测量值小约 1.4 dB, 这主要由于 QuikSCAT VV 极化与 HH 极化入射角不同。选取 QuikSCAT 2009 年测得的亚马逊雨林  $\sigma^0$  值在雨林年均  $\sigma^0 \pm 0.5$  dB 范围内的区域作为 RFSCAT 的定标目标, 得到如图 3(b) 新的定标地图。

表 4 QuikSCAT 在亚马逊热带雨林测得的平均后向散射系数(dB)

	2003 年	2003 年	2009 年	2009 年
	升轨	降轨	升轨	降轨
内波束 (HH 极化)	-7.3	-7.8	-7.3	-7.9
外波束 (VV 极化)	-8.7	-9.2	-8.7	-9.3

4.2 定标时间窗口选取

为了获得足够多的采样样本对散射计进行在轨定标, 需要对地面目标进行多轨测量。把进行定标的测量时间范围定义为定标窗口。如果定标窗口太大, 因时间变化对  $\sigma^0$  变化的影响较大, 且无法观测到仪器和雨林  $\sigma^0$  的变化; 如果定标窗口太小, 获得的定标样本数太少。利用 QuikSCAT 测得的雨林  $\sigma^0$

变化情况结合 CFOSAT/SCAT 系统参数对散射计不同的窗口条件下采样样本数及雨林  $\sigma^0$  进行仿真, 然后对散射计其中一个方位区间定标结果进行分析, 计算其均方误差, 如图 4 所示。

从图 4 中可以看出, 选取 3~7 天作为定标窗口都比较合适, 定标窗口选取 3~7 天中任一天对定标精度的影响都很小, 在 0.01 dB 范围内。

5 RFSCAT 定标仿真及结果

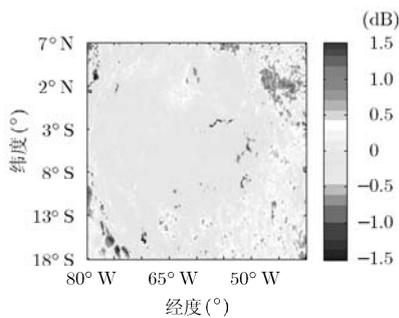
为了验证该定标方法的效果, 选取 SASS 升轨测量亚马逊雨林  $\sigma^0$  的四阶模型的平均值作为模拟雨林等效  $\sigma^0$  的四阶模型系数<sup>[9]</sup>, 即:  $c_{\text{eff}}(0)=-7.660$ ,  $c_{\text{eff}}(1)=-1.079$ ,  $c_{\text{eff}}(2)=0.121$ ,  $c_{\text{eff}}(3)=-0.012$ ,  $c_{\text{eff}}(4)=0.079$ , 得到无噪信号  $\sigma_{\text{eff}}^0$ , 利用蒙特卡罗仿真法得到仿真信号:

$$\hat{\sigma}_{\text{meas}}^0 = \sigma_{\text{eff}}^0 + \Delta\sigma_r^0 + G_p + \sigma_{\text{eff}}^0 \cdot N(0, K_p) \quad (14)$$

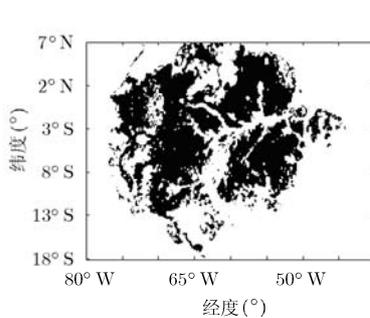
其中  $N(0, K_p)$  表示均值为 0 方差为  $K_p$  的正态随机分布,  $\sigma_{\text{eff}}^0 \cdot N(0, K_p)$  表示噪声项。

5.1 插入损耗定标

利用 3.1 节的定标方法, 加入最大值为 0.5 dB 的正弦偏差, 得到 24 个方位区间的定标校正量, 如图 5 所示。定标前  $\sigma^0$  仿真值和定标后  $\sigma^0$  值对比结果如图 6 所示。从图中可以看出该方法能够消除天线旋转过程中带来的误差影响, 实现散射计旋转扫描过程中在不同方位向测量的一致性。把仿真的模型相对偏差与校正的平均相对偏差进行对比, 如图 7。采用此方法可以得到定标的均方误差小于 0.06 dB。



(a) 2009 年与 2003 年亚马逊雨林  $\sigma^0$  之差



(b) 亚马逊雨林定标地图

图 3 亚马逊雨林地图

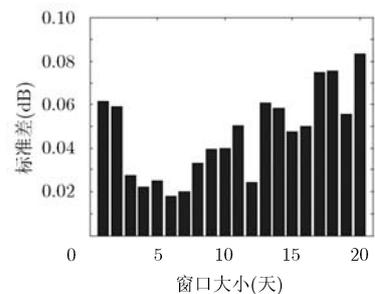


图 4 不同窗口条件下的均方误差

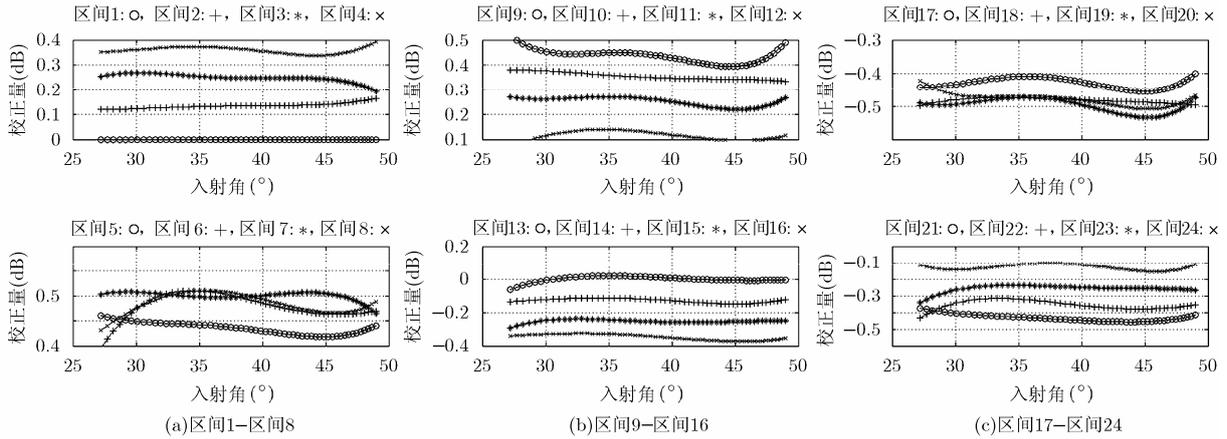


图 5 24 个方位区间定标校正量

从图 5 中可以看出对于同一波束，不同入射角的校正量会随着入射角有小于 0.05 dB 的扰动。扰动主要集中于足迹近端和远端处，在天线峰值增益对应的足迹中间处扰动很小，主要原因是在足迹近端和足迹远端处信噪比较小，导致该处的传递误差  $K_{pc}$  较大，如图 8 所示。在利用式(14)进行仿真时，一定定标窗口条件下，同样的样本数对  $\hat{\sigma}_{meas}^0$  进行平均处理时，足迹近端和远端处对应的  $\hat{\sigma}_{meas}^0$  的残留热噪声较大，因此会导致校正量在足迹远近端有扰动。为了尽量减小扰动，对几个连续定标周期的校正量进行平均处理，这样并没有扩大定标时间窗口，不会引入额外的  $\sigma^0$  随时间的偏差。把相对偏差最大值增大到 1.0 dB 时，仍能得到小于 0.06 dB 的定标精度。

### 5.2 天线方向图定标

利用 3.2 节对天线方向图的校正方法，在仿真时加入了天线增益变化。当天线发生变化时，在进行  $\sigma^0$  计算时，仍采用原天线方向图会引入较大误差，必须计算变化后新的天线方向图。图 9 给出了模拟天线增益偏差和估计的天线增益偏差，并利用

式(12)估计的天线偏差得到新的天线方向图。并可以得出每一个地面分辨条带对应应该入射角处天线增益的变化量。

### 6 结束语

本文结合 RFSCAT 扇形波束旋转扫描的特点并基于 CFOSAT/SCAT 散射计的系统参数，对 RFSCAT 地面扩展目标外定标进行了分析并给出了可行的定标方法。基于地面扩展外定标原理和要求，利用 QuikSCAT 散射计的 L2A 数据和图像重构 (SIR) 数据，针对地球表面  $\sigma^0$  稳定的区域，给出了定标地图和定标时间窗口的选取方案。

本文给出的基于地面扩展目标的定标方法把散射计各方位区间之间测量的  $\sigma^0$  偏差调整到同一个参考方位区间上，可用于消除 RFSCAT 因天线转动机构旋转关节插入损耗波动带来的方位向测量偏差；通过对比不同时期对雨林的测量值，监测天线方向图变化，特别是俯仰天线方向图的变化，并利用该方法进行定标，避免了因天线方向图变化带来额外的误差。本文利用 SASS 升轨测量后向散

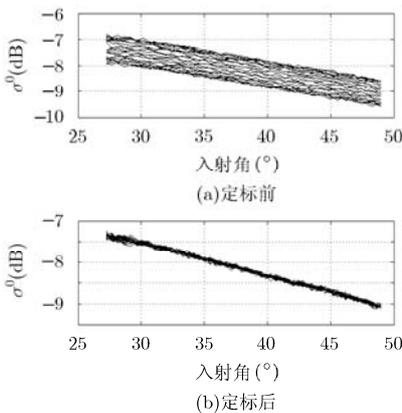


图 6 24 个方位区间测量值定标前后对比

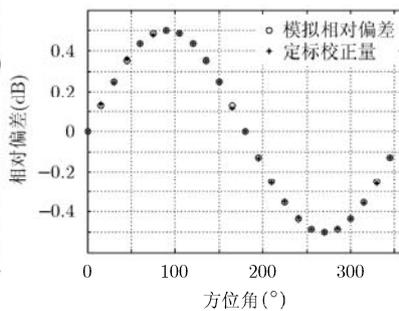


图 7 平均定标校正量与模拟相对偏差比较

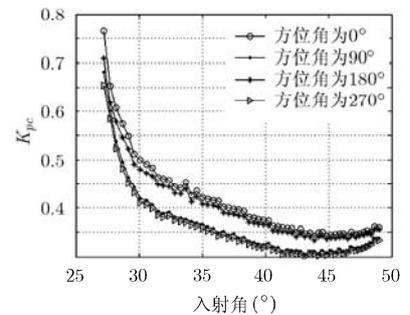


图 8 不同方位角的传递误差  $K_{pc}$

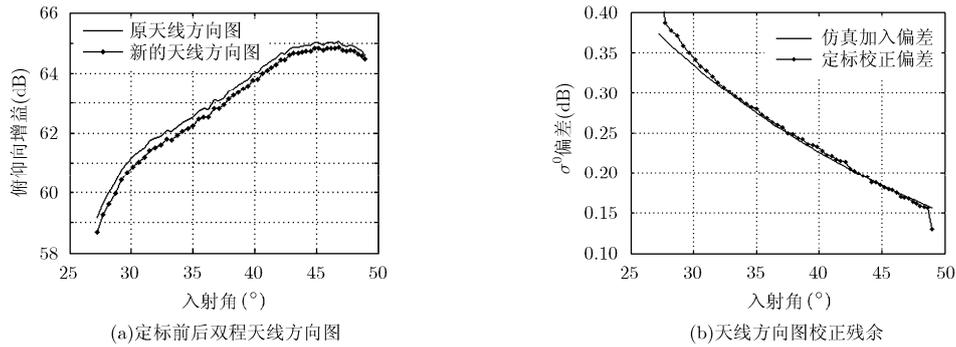


图 9 俯仰方向图定标

射系数的四阶系数模拟  $\sigma_{\text{eff}}^0$  并加入最大值为 0.5 dB 的正弦偏差, 仿真结果能得到小于 0.06 dB 定标精度。当增大加入误差到 1.0 dB 时, 定标结果未发生显著变化, 仍能得到小于 0.06 dB 的定标精度, 验证了该方法的有效性, 表明该方法能够用于 RFSCAT 的在轨外定标。

本文考察了热带雨林、冰盖等自然扩展目标, 结合 CFOSAT 散射计的系统参数, 考察了冰盖和雨林的向后散射特性, 分析表明格陵兰岛冰盖和南极冰盖由于  $\sigma^0$  的各向异性不适合用来作为 RFSCAT 散射计的定标目标。在此基础上, 给出了应用亚马逊热带雨林的定标地图和定标时间窗口的选取方案。

本文给出的基于地面扩展目标的定标方法并不能对  $\sigma^0$  绝对偏差和散射计方位向天线方向图进行定标, 在 RFSCAT 在轨运行过程中, 可以将陆地自然扩展目标、典型海区 and 地面定标站结合使用, 实现 RFSCAT 定标的精确性, 提高风场的反演精度。**致谢** 感谢 PODAAC/JPL 提供的 QuikSCAT L2A 数据和杨百翰大学(BYU) MERS David Long 教授领导的 SCP 科学小组提供的 SIR 数据。

### 参 考 文 献

- [1] Dong Xiao-long, Zhu Di, Lin Wen-ming, *et al.*. A Ku-band rotating fan-beam scatterometer: design and performance simulations[C]. *IEEE IGARSS'2010*, Honolulu, Hawaii, 2010: 1081-1084.
- [2] Long D G and Skouson G B. Calibration of spaceborne scatterometers using tropical rain forests[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(2): 413-424.
- [3] Elyoucha A and Neyt X. C-band satellite scatterometers intercalibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(3): 1478-1491.
- [4] Wilson J J W, Anderson C, *et al.*. Radiometric calibration of the advanced wind scatterometer radar ASCAT carried onboard the METOP-A satellite[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(8): 3236-3255.
- [5] Verspeek J, Stoffelen A, *et al.*. Validation and calibration of ASCAT using CMOD5.n[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(1): 386-395.
- [6] Anderson C, Figa J, *et al.*. Validation of backscatter measurements from the advanced scatterometer on Metop-A [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, 29(1): 77-88.
- [7] Dong Xiao-long, Liu Dao-zhi, Zhu Jin-tai, *et al.*. Some considerations about the in-orbit calibration of spaceborne rotating fan beam radar scatterometer[C]. *IEEE IGARSS'2011*, Vancouver, 2011: 965-968.
- [8] Lin Wen-ming and Dong Xiao-long. Design and optimization of a Ku-band rotating, range-gated fanbeam scatterometer[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(8): 2151-2171.
- [9] Skouson G B. Calibration of Seasat scatterometer using tropical rainforest[D]. [Master dissertation], Brigham Young University, 1992.
- [10] Kennett R G and Li F K. Seasat over-land scatterometer data. II. Selection of extended area and land-target sites for the calibration of spaceborne scatterometers[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(6): 779-788.
- [11] Long D G and Drinkwater M R. Azimuth variation in microwave scatterometer and radiometer data over Antarctica[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(4): 1857-1870.

朱金台: 男, 1987年生, 博士生, 研究方向为星载微波散射计在轨定标方法和技术研究。

董晓龙: 男, 1969年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向包括微波遥感成像与探测的理论与方法研究、先进星载、机载和地基主、被动微波遥感器研制。