

## 低频 UWBSAR 辐射校准模型\*

邹 鲲,董 臻,梁甸农

(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘要** :低频超宽带合成孔径雷达(Ultra Wide Band Synthetic Aperture Radar, UWBSAR)的辐射校准是系统研制和应用过程中必须面对的课题。低频 UWBSAR 的特点使得常规 SAR 辐射校准技术不再适用。充分考虑校准参数随频率和方位角的变化,给出适合该系统的辐射校准方法,得到低频 UWBSAR 图像辐射校准模型。利用该模型,对系统辐射校准误差进行了分析。

**关键词** :低频超宽带合成孔径雷达;辐射校准;校准误差

中图分类号 :TP957 文献标识码 :A

## Radiometric Calibration Model of Low Frequency UWBSAR

ZOU Kun, DONG Zhen, LIANG Dian-nong

(College of Electronic Science and Technology, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** :Radiometric calibration is considered as an important and inevitable problem in the development and application of low frequency ultra wide band synthetic aperture radar (UWBSAR) system. Due to the characteristics of the UWSAR, the calibration procedure developed for the regular SAR is no longer feasible. With a careful consideration of the calibrating parameters which vary with the change of the frequency and the aspect angle, this paper proposes that the radiometric calibration method is applicable to the low frequency UWBSAR and a model of radiometric calibration is presented. With the help of such a model, the analysis of the system calibration error was conducted.

**Key words** :low frequency UWBSAR; radiometric calibration model; calibration error

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为一种全天候全天时的二维微波成像设备,其最终目的是反演地物电磁波散射特性<sup>[1]</sup>,因此建立目标后向散射系数与 SAR 图像灰度值的量化关系是非常重要的。通过辐射校准<sup>[2]</sup>可以获得这种量化关系。

低频 UWBSAR 的特点<sup>[3-4]</sup>导致常规高频窄带 SAR 的辐射校准方法不再适用。首先低频特性使得辐射校准中的定标体散射特性属于低频谐振散射,其散射特性必须使用低频电磁散射模型计算。低频特性使得系统天线方位向具有较大的波束张角,则在辐射校准中不能够忽略定标体散射特性和天线方向图随方位角的变化。系统的超宽带特性也使得在辐射校准过程中的各个参数随频率的变化不能忽略。

### 1 低频 UWBSAR 辐射校准模型

辐射校准的过程就是获得 SAR 图像灰度值和后向散射系数之间的量化关系的过程<sup>[5-6]</sup>。如果针对每幅 SAR 图像,都得到了相应的量化关系,则这些 SAR 图像之间就可以进行对比分析,而无论这些 SAR 图像是否来自不同的雷达系统或不同的时间和空间。雷达方程可以完整描述目标散射特性与测量值之间的量化关系,因此本节首先从雷达方程入手,得到点目标和分布式目标的低频 UWBSAR 雷达方程,并结合定标体的低频超宽带电磁散射特性,给出 SAR 图像的辐射校准模型。

\* 收稿日期:2005-09-05  
基金项目:国家部委基金资助项目(41307020203)  
作者简介:邹鲲(1976—),男,博士生。

### 1.1 辐射校准中的雷达方程

通常文献<sup>[7-8]</sup>中给出的雷达方程只适用于常规 SAR 系统,且主要针对系统设计和目标检测,不适合进行辐射校准的分析。本文考虑利用点目标对 SAR 图像进行辐射校准,因此必须考虑点目标雷达方程和分布式目标雷达方程。与常规雷达不同的是,系统各个参量随频率或方位角的变化不能忽略,因此经过相干处理后,点目标的回波功率可以表示为

$$P_r'(\theta_0, f) = \frac{P_t G^2(\theta_0, f) G_r(f) \lambda^2}{(4\pi)^3} \cdot \frac{\sigma(\theta_0, f)}{R^2(\theta_0)} \left( \frac{\lambda f_{PRF}}{2V\rho_a f_s \tau_p} \right)^2 L_\omega L_\phi L_\theta + P_n \left[ \frac{\lambda R(\theta_0) f_{PRF}}{2V\rho_a} f_s \tau_p \right] L_\omega \quad (1)$$

式(1)表示经过聚焦后,点目标回波在方位向空域、距离向频域的表达。其中  $\theta_0$  表示雷达的波束指向角,对于正侧视 SAR,  $\theta_0 = 0$ 。采样频率为  $f_s$ ,脉宽为  $\tau_p$ 。参数  $L_\omega$  表示匹配滤波时为了降低旁瓣进行的加窗处理引入的损耗。 $L_\phi$  表示匹配滤波器失配造成的功率损耗。参数  $L_\omega$  和  $L_\phi$  也可以分为方位向和距离向两种情况。式(1)中的目标回波功率是波束张角内的目标回波的叠加,如果表示为波束指向角  $\theta_0$  的函数,必然会引入一个误差量  $L_\theta$ ,其大小来自雷达方程中与方位角有关的量:天线增益  $G$ ,目标到雷达距离  $R$  和目标自身散射特性。

在辐射校准过程中,对分布式目标的雷达方程的研究是十分必要的。因为 SAR 图像可以用分布式目标的雷达方程来建立其与分布式目标散射系数之间的关系。相干处理后的雷达方程可以表示为

$$P_i'(\theta_0, f) = \frac{P_t G^2(\theta_0, f) G_r(f) \lambda^2}{(4\pi)^3} \cdot \frac{\sigma(\theta_0, f)}{R^2(\theta_0)} \cdot \frac{\rho_a \rho_r}{\sin\phi} \left( \frac{\lambda f_{PRF}}{2V\rho_a f_s \tau_p} \right)^2 L_\omega L_\theta + P_n \left[ \frac{\lambda R(\theta_0) f_{PRF}}{2V\rho_a} f_s \tau_p \right] L_\omega \quad (2)$$

与点目标雷达方程类似,参数  $\rho_a$  和  $\rho_r$  分别表示方位向和距离向分辨率。由于对于均匀目标,不考虑匹配滤波器失真带来的损耗,因此不用考虑参数  $L_\phi$ 。

### 1.2 定标体电磁散射模型

本文采用的定标体以金属三面角反射器为例。对于低频 UWBSAR 系统,角反射器尺寸通常与波长相比拟,其散射特性属于低频谐振散射<sup>[9]</sup>,角反射器 RCS 依赖于频率和入射角,而常规高频窄带 SAR 外部校准<sup>[10]</sup>中定标体 RCS 通常忽略随频率和角度的变化,从而导致了常规 SAR 的外部校准技术不再适用。低频电磁散射特性可以用矩量法<sup>[11]</sup>进行计算,但矩量法存在一个弊端,就是每次只可以计算一个给定频点和入射角的电磁散射特性。对于低频 UWBSAR 而言,需要的是角反射器在超宽带频带和宽入射角范围内的散射特性。可以将矩量法结合渐进波形估计技术<sup>[12]</sup>计算。渐进波形估计技术类似于级数展开方法,通常利用 Taylor 级数展开的方法,但其收敛区间较窄,不适合进行 UWB 内的散射特性的计算,本文采用 Pade 近似的方法,即利用有理分式展开,获得 UWB 内的散射特性,结果与矩量法计算结果相吻合<sup>[13]</sup>。

### 1.3 辐射校准模型

为了方便理论分析,在辐射校准前,可以对雷达方程(1)(2)用信号幅度归一化因子  $\sqrt{nL_\omega}$  归一化,使得相干处理前后的噪声功率不变:

$$P_r = \frac{P_{tc} G^2(\theta_0, f) G_r(f) \lambda^3 f_{PRF} f_s \tau_p}{(4\pi)^3 R_c^3(\theta_0) 2V_c \rho_a} \sigma_c(\theta_0, f) L_{\theta c} + P_{nr} \quad (3)$$

$$P_i = \frac{P_{ti} G^2(\theta_0, f) G_r(f) \lambda^3 f_{PRF} f_s \tau_p \rho_r}{(4\pi)^3 R_i^3(\theta_0) \sin\phi 2V_i} \sigma_i(\theta_0, f) L_{\theta i} + P_{ni} \quad (4)$$

其中下标  $c$  表示定标体的雷达方程参数,下标  $i$  表示分布式目标雷达方程的参数,没有下标的参数被认为是两次测量过程中不变化的量。在式(3)中,假定定标体的 RCS 是已知的,而定标体的回波数据  $P_r$  可以利用定标体的 SAR 图像进行测量得到。式(4)中 SAR 图像数据  $P_i$  可以通过测量得到,而散射系数  $\sigma^0$  则是需要进行估计的。利用式(3)(4)就可以用点目标的 SAR 图像实现校准:

$$\sigma(\theta_0, f) = \frac{(P_i - P_{ni}) V_i R_i^3(\theta_0) \sin\phi_i L_{\theta i}}{P_{ti} G_r(f) \rho_r \rho_a} L_{\theta i} \times \frac{P_{tc} G_r(f) G_c^2(\theta_0, f) \sigma_c(\theta_0, f)}{(P_r - P_{nr}) V_c R_c^3(\theta_0)} \times \frac{1}{G_c^2(\theta_0, f)} \times \frac{L_{\theta c}}{L_{\theta i}}$$

$$= A \times B \times C \times D \tag{5}$$

利用式(5)可以得到 SAR 图像的测量值  $P_i$  和目标后向散射系数  $\sigma^0$  之间的关系。其中  $A$  与内部校准参数有关,可以通过在系统内部加入校准设备进行测量。 $B$  表示定标体有关的参量, $C$  表示外部校准参数, $D$  表示 UWBSAR 雷达方程中特有的误差量。其中  $B$  的测量是关键,只有在接收机动态范围内尽可能多地分布 RCS 不同的定标体,才可以对  $B$  实现较为准确的估计。

## 2 辐射校准模型误差分析

对校准模型的误差分析通常可以采用标准差误差模型和相对标准差误差模型<sup>[14-15]</sup>。本文采用相对标准差误差模型,它相当于对标准差误差模型的归一化处理,从而更方便分析各个误差分量对整体误差的贡献。

### 2.1 内部校准参数

对于式(5)中  $A$  项,利用相对标准差的组合误差公式<sup>[15]</sup>得到

$$\epsilon_A^2 = \frac{S_{P_i}^2 + S_{P_{ni}}^2}{P_i - P_{ni}} + \epsilon_{P_{ni}}^2 + \epsilon_{\rho_r}^2 + \epsilon_{\rho_a}^2 + \epsilon_{G_{ri}}^2 + \epsilon_{V_i}^2 + 9\epsilon_{R_i}^2 + \epsilon_{\sin\phi_d}^2 + \epsilon_{L_\phi}^2 \tag{6}$$

SAR 图像的灰度值的均值  $\bar{P}_i$  和方差  $S_{P_i}$  可以直接从图像中进行统计测量,噪声的均值  $\bar{P}_{ni}$  和方差  $S_{P_{ni}}$  可以通过对反射较弱的场景,如湖面的 SAR 图像进行估计得到。发射功率的相对标准差  $\epsilon_{P_{ni}}$  可以通过内部校准设备进行测量。距离向和方位向分辨率的相对标准差  $\epsilon_{\rho_r}$  和  $\epsilon_{\rho_a}$  可以在系统设计的时候确定下来。 $\epsilon_{G_{ri}}^2$  来自系统接收机增益的测量误差。通常的方法是在系统天线输出处加入标准信号源,通过校准环路,对该信号进行处理,从而实现了对系统增益的实时监控。速度的测量误差  $\epsilon_{V_i}^2$  可以通过 GPS 定位系统及各种惯导设备进行估计。参数  $L_\phi$  是由匹配滤波器的相位不匹配造成的功率损耗,通常可以忽略。

由 SAR 的几何关系可知,  $R = h / \cos\phi$ , 利用误差传播理论,可以得到

$$\epsilon_R^2 = \epsilon_h^2 + \tan^2\phi S_\phi^2 \tag{7}$$

从式(7)可以得出,当  $h$  的测量误差和下视角测量误差一定时,增大飞行高度  $h$  或减小下视角  $\phi$ ,可以降低  $R$  的相对标准差。角度  $\phi_d$  的正弦引入的相对标准差  $\epsilon_{\sin\phi_d}$  不能直接测量。利用几何关系  $\phi_d = \arccos(h/R)$ , 可以得到

$$\epsilon_{\sin\theta}^2 = \frac{S_{\sin\phi_d}^2}{\sin^2\phi_d} = \frac{1}{\tan^4\phi_d} (\epsilon_h^2 + \epsilon_R^2) \tag{8}$$

如果假定高度测量误差为  $\pm 50\text{m}$ , 距离测量误差为  $\pm 50\text{m}$ , 采用机载参数,可以得到  $\epsilon_{\sin\phi_d}$  随下视角  $\phi_d$  和高度  $h$  的变化关系。

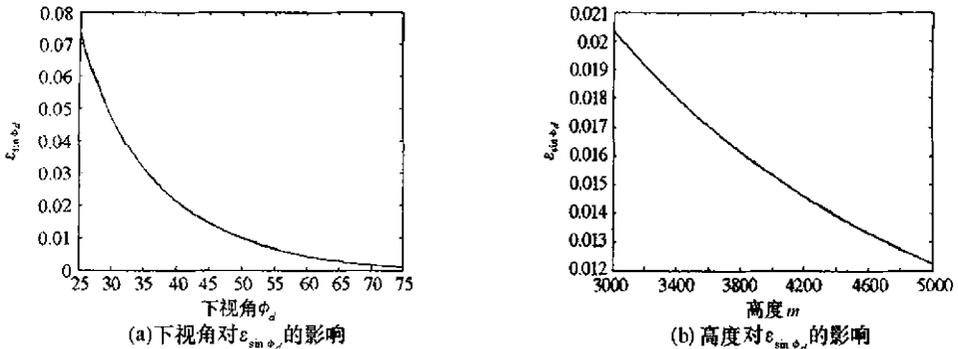


图1 下视角和高度对  $\epsilon_{\sin\phi_d}$  的影响

Fig.1 The effect on  $\epsilon_{\sin\phi_d}$  due to depress angle and height

如图1所示,增大下视角和增加飞行高度,都可以降低  $\epsilon_{\sin\phi_d}$ 。这是因为通过增加下视角,使斜距增

大,从而降低斜距的相对标准差。增加飞行高度,降低了高度的相对标准差,从而使  $\sin\phi_d$  的相对标准差下降。

## 2.2 外部校准参数

式(5)中  $C$  项只包括天线方向图。天线方向图参数通常依赖外部测量,且由于天线方向图是频率的函数,因此在测量过程中,必须考虑天线增益随频率的变化特性。在天线设计过程中,为保证超宽带信号通过收发天线后不失真,天线增益在工作带宽内必须与频率成正比,或者与发射信号波长成反比<sup>[4]</sup>。与分析内部校准误差一样,由式(5)利用相对标准差的组合误差公式<sup>[15]</sup>得到外部校准参数的相对标准差:

$$\epsilon_C^2 = 4\epsilon_{G_i}^2 \quad (9)$$

## 2.3 定标体校准参数

在辐射校准过程中,通常采用多个定标体进行校准,因此式(5)中  $B$  项实际上是多个测量值的线性回归估计:

$$P_{ij} = \frac{1}{B(f)} \cdot \frac{P_{\text{ref}} G_{\text{ref}}(f) G_c^2(\theta_0, f) \sigma_c(\theta_0, f)}{V_{\text{ref}} R_c^3(\theta_0)} + P_{\text{nrj}} + e_j = \alpha \cdot X_j + \beta + e_j, \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (10)$$

其中  $M$  为辐射校准中定标体的个数,定标体的 RCS  $\sigma_c(\theta_0, f)$  是假定已知的,定标体在 SAR 图像中对应点的功率值  $P_{ij}$  由测量得到,图像噪声功率  $P_{\text{nrj}}$  通常是从 SAR 图像中较弱的场景内估计得到。其他参数的测量及其误差分析在前面已经讨论了。利用误差传播理论,得到式(10)的估计方差:

$$S_Y = \sqrt{\left[ \frac{1}{N} + \frac{(X - \bar{X})^2}{\sum_{j=1}^N x_j^2 - \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N x_i)^2} \right] S_\sigma} \quad (11)$$

其中  $S_\sigma$  表示误差项的标准差,可见通过增大  $N$  的数目,减小  $X$  的动态范围,可以提高式(10)的估计精度。如果从校准的层面上解释就是利用较多数目 RCS 相接近的定标体可以获得较为精确的估计。而为了获得系统整个动态范围内的传输函数,定标体 RCS 的大小应该使得其回波信号能量能够分布在系统的整个动态范围内。

## 2.4 损耗因子

损耗因子的估计是比较复杂的,由前面的分析可知,  $L_{\theta_0}$  损耗来自三个方面:天线方向图,目标到雷达的距离和目标自身的散射特性。由于天线增益  $G$ ,目标散射特性和距离  $R$  对  $L_{\theta_0}$  的贡献是耦合的,如果这三个量已知,则可以利用式(3)计算参考目标的  $L_{\theta_0}$ :

$$L_{\theta_0}(f) = \frac{1}{N} \cdot \frac{R_c^3(\theta_0)}{G_c^2(\theta_0, f) \sigma_c(\theta_0, f)} \sum_{n=1}^N \frac{G_c^2(\theta_n, f)}{R_c^3(\theta_n)} \sigma_c(\theta_n, f) \quad (12)$$

考虑到待校准场景为分布式目标,其散射特性的相位随角度的相关性较弱,因此可以忽略其对  $L_{\theta_0}$  的贡献,仅利用天线增益  $G$  和距离  $R$  用式(4)计算  $L_{\theta_0}$ 。

$$L_{\theta_0}(f) \approx \frac{1}{N} \cdot \frac{R_c^3(\theta_0)}{G_c^2(\theta_0, f)} \sum_{n=1}^N \frac{G_c^2(\theta_n, f)}{R_c^3(\theta_n)} \quad (13)$$

本节将对这三种情况引入的损耗分别进行定量讨论。

首先考虑距离近似引入的损耗  $L_{\theta R}$ ,其产生的原因是沿方位向相干叠加过程中,用  $R(\theta_0)$  代替了  $R(\theta)$ 。图2给出了  $L_{\theta R}$  与下视角和斜视角的变化关系,从图中可以看出,随着下视角减小和斜视角的增大,  $L_{\theta R}$  随之增大。对于正侧视 SAR,下视角为  $45^\circ$  时,  $L_{\theta R} \approx -0.25$  dB。

参数  $L_{\theta G}$  也是频率的函数。表1表示了在下视角  $45^\circ$  的条件下,参数  $L_{\theta G}$  与频率的对应关系。

表1给出了  $1\text{m}$  角反射器的  $L_{\theta G}$  与频率的关系。随着频率的升高,天线方向图的波束宽度变窄,与理想全方向天线的差别越大,损耗因子  $L_{\theta G}$  就越大。目标散射特性引入的  $L_{\theta_0}$  在中心频率处较大,这是因为波长和角反射器尺寸相接近时,出现了类似谐振散射的现象,从而导致了散射特性偏离理想点散射特

性。它也是频率的函数。

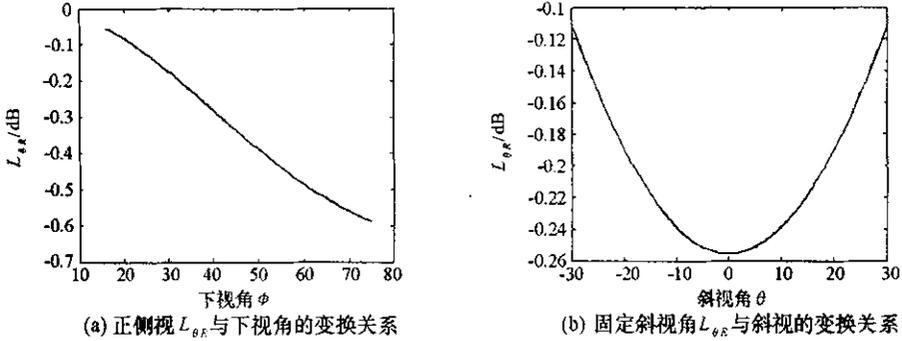


图2  $L_{\theta R}$  与下视角和斜视的变换关系

Fig.2 The relationship between  $L_{\theta R}$  and depress angle and azimuth angle

表1  $L_{\theta G}, L_{\theta v}$  与频率关系

Tab.1 The relationship between  $L_{\theta G}, L_{\theta v}$  and frequency

频率(MHz)	$L_{\theta G}$ (dB)	$L_{\theta v}$ (dB)
250	-2.60	0.04
300	-3.39	0.86
350	-3.64	1.12
400	-3.64	1.15
450	-3.99	1.43
500	-4.51	1.12
550	-4.87	0.29

### 3 结论

SAR 辐射校准本身就是一项复杂的系统工程,而低频 UWBSAR 系统的新特性导致了常规的 SAR 校准技术不能适用<sup>[5-6,16]</sup>。本文给出了利用点目标实现低频 UWBSAR 图像的校准模型,其中考虑到了定标体自身的散射特性。利用校准模型,对外部校准参数,内部校准参数以及定标体引入的校准参数进行了误差分析。

### 参考文献:

- [1] Freeman A, Curlander J C. Radiometric Correction and Calibration of SAR Images[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1989, 55(9):1295-1301.
- [2] Freeman A. SAR Calibration: An Overview[J]. IEEE Trans., GRS, 1992, 30(6):1107-1121.
- [3] Soumekh S. Reconnaissance with Ultra Wideband UHF Synthetic Aperture Radar[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1995, 12(4):21-40.
- [4] 常文革.超宽带合成孔径雷达[J].系统工程与电子技术,2000,22(1):55-58.
- [5] 邹鲲,梁甸农.低频 UWBSAR 图像辐射校准[J].电子学报,2005,33(4):721-724.
- [6] 邹鲲,梁甸农,董臻.低频 UWBR 的辐射校准[J].国防科技大学学报,2004,26(6):58-60.
- [7] 袁孝康.合成孔径雷达方程[J].上海航天,2002,3:1-5.
- [8] 谢桢楠.雷达方程在星载合成孔径雷达中的应用[J].上海航天,2001,6:1-4.
- [9] Geng N, Ressler M A, Carin L. Wide-band VHF Scattering from a Trihedral Reflector Situated above a Lossy Dispersive Halfspace[J]. IEEE Trans. GeoSci. Remote Sensing, 1999, 37(5):2609-2617.
- [10] Curlander J C, McDonough R N. 合成孔径雷达,系统和信号处理[R].陆军,译,合肥,华东电子工程研究所,1999.
- [11] Rao S M, Wilton D R, Glisson A W. Electromagnetic Scattering by Surfaces of Arbitrary Shape[J]. IEEE Trans. AP, 1982, 30(5):409-418.
- [12] Cockrell C R, Beck F B. Asymptotic Waveform Evaluation (AWE) Technique for Frequency Domain Electromagnetic Analysis[R]. NASA Technical Memorandum 110292,1996.
- [13] 邹鲲,梁甸农.低频超宽带 SAR 定标体散射特性[J].信息与电子工程,2005,3(1):14-17.
- [14] Kasishchke E S, Fowler G W. A Statistical Approach for Determining Radiometric Precisions and Accuracies in the Calibration of Synthetic Aperture Radar Imagery[J]. IEEE Trans., GRS, 1989, 27(4):416-427.
- [15] Meyer S L. Data Analysis for Scientists and Engineers[M]. New York: Wiley, 1975.
- [16] 邹鲲,梁甸农.基于回波域的低频 UWBSAR 极化校准[J].国防科技大学学报,2005,27(2):65-69.

