

# 星载 SAR 辐射定标误差分析及成像处理器增益计算<sup>1</sup>

彭江萍 丁赤胤 彭海良

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**摘 要** 本文对星载 SAR 辐射定标的各项误差因素进行了分析, 提出了计算辐射定标误差的公式, 提供了分配星载 SAR 系统辐射定标误差的工具; 对基于 CS (Chirp Scaling) 算法的成像处理器的增益计算公式进行了推导, 并通过计算机仿真得到了验证; 定量地分析了成像处理器增益计算误差对 SAR 系统辐射定标精度的影响。

**关键词** 星载 SAR、辐射定标、CS 算法、成像处理器增益

**中图分类号** TN951

## 1 引言

合成孔径雷达 (SAR) 自 50 年代出现以来, 已成功地应用于地质、水文、农业、林业、海洋、制图测绘和军事侦察领域。最初这些应用主要依据雷达图像提供的有关位置、形状和目标回波相对变化的信息, 即是定性遥感技术。定性遥感技术在诸如地杂波统计特性研究、土壤湿度测量、作物精确分类、海面实况调查、目标识别等许多方面的应用中受到极大限制。在这些应用中, 都要求知道目标回波的绝对值, 即需要定量的遥感技术。由于 SAR 系统的整个信号流程中存在着许多误差源, 雷达参数和成像参数的不确定性及其随机变化, 使得 SAR 系统总传递函数具有不确定性, 导致雷达图像测量的重复性差和雷达图像不能精确反映实际地物目标的回波特性。为此, 需要对雷达系统进行辐射定标, 直接建立雷达图像与地物后向散射系数的精确关系, 使雷达能够进行重复性测量。国际上新一代星载 SAR 系统, 如 ERS-1、SIR-C、X-SAR 和 RADARSAT 等, 均采用了辐射定标技术<sup>[1-4]</sup>。

星载 SAR 辐射定标需要对 SAR 系统从发射信号到产生图像整个信号流程中的各种增益误差进行校正, 从而得到直接反映地物后向散射系数的雷达图像。其中包括三个主要方面: 发射机和接收机增益校正, 雷达天线方向图增益校正, 成像处理系统增益校正。即使辐射定标后的图像也不可能绝对准确地代表地物后向散射系数, 不同的 SAR 图像应用领域对辐射定标精度提出了不同的要求, 大部分的应用要求辐射定标误差小于 1dB<sup>[5]</sup>。

本文对引起星载 SAR 系统辐射定标误差的各项因素进行了分析, 提出了辐射定标误差的公式; 对基于 CS 算法的成像处理器的增益进行了研究, 推导了处理器增益的精确计算公式, 并通过计算机仿真得到了验证; 最后得出了关于成像处理器增益计算误差对 SAR 系统辐射定标精度的影响的定量结论。

## 2 星载 SAR 系统辐射定标误差分析

### 2.1 星载 SAR 系统中的辐射定标误差源

在整个星载 SAR 系统中由于从发射信号到图像生成整个过程中存在着许多不确定因素, 会引起信号的失真, 因而在工程中实现精确的辐射定标十分困难。简单地说明这些不确定因素如下<sup>[6]</sup>:

<sup>1</sup> 1999-03-04 收到, 1999-07-08 定稿  
微波成像技术国家重点实验室支持项目

(1) 天线与传播 雷达发射波与回波经过大气层(包括电离层)传播后其电磁参数会发生改变,如幅度衰减、群延迟、极化方向改变。但是对于频率高于 1GHz 的雷达系统这些误差都很微小,可以忽略。

雷达天线是辐射定标主要误差源之一。雷达发射/接收天线方向图随着方位角而变化,相当于对雷达发射波/回波进行了方位向加窗,而距离向天线方向图相当于进行了距离向加窗,由此产生的像素值失真必须在辐射定标中加以消除。只能用外定标的方法测量天线方向图,对天线方向图测量的精度将直接影响辐射定标的精度。

(2) 发射机/接收机 发射机/接收机的性能会由于系统老化或环境温度变化而发生变化,如发射机功率变化、接收机增益变化,这些性能可以运用内定标装置得到比较精确的测量,从而在辐射定标中得到精确的补偿。

(3) 成像处理器 成像处理系统的增益主要来自成像算法,应根据所采用的具体算法进行分析和定标。成像处理器对回波信号的多普勒中心频率和调频率估计的误差,以及数字处理中的量化误差也会引起成像处理器增益的误差。

此外,还有因目标斜距、入射角估计误差,系统热噪声估计误差产生的辐射定标误差。

## 2.2 辐射定标误差分析

根据雷达方程,可以推导出雷达图像像素值  $P^I$  与地面分布目标的平均雷达后向散射率  $\sigma^0$  的关系如下:

$$P^I = \frac{\sigma^0 P_t G_{tr} G_{(\varphi)}^2 \lambda^2 \delta_x \delta_{R_s} C^2}{(4\pi)^3 R^4 \sin \alpha} + \bar{P}'_n, \quad (1)$$

其中  $P_t G_{tr}$  为发射功率与收发通道增益之积,  $G_{(\varphi)}^2$  为双程天线方向图,  $\lambda$  为发射信号波长,  $\delta_x$ 、 $\delta_{R_s}$  分别为方位向、距离向分辨率,  $C^2$  为成像处理器引入的信号功率增益,  $R$  为目标斜距,  $\alpha$  为波束入射角,  $\bar{P}'_n$  为图像中包含的热噪声功率。

将上式表达为目标平均后向散射率与各项误差因素的关系为

$$\sigma^0 = \frac{(P^I - \bar{P}'_n)(4\pi)^3 R^4 \sin \alpha}{P_t G_{tr} G_{(\varphi)}^2 \lambda^2 \delta_x \delta_{R_s} C^2}. \quad (2)$$

为了评价各项误差因素对  $\sigma^0$  的影响,使用偏微分的方法进行分析。因为天线增益、发射功率、收发通道增益、处理器增益、斜距、入射角等测量值的误差都可以认为是均值为零、高斯分布的相互独立的随机变量,所以用它们的测量值的标准差表示其误差。

$\sigma^0$  的相对误差  $\varepsilon_{\sigma^0} = S_{\sigma^0}/\sigma^0$  与各误差因子的标准差之间的关系为

$$\left(\frac{S_{\sigma^0}}{\sigma^0}\right)^2 = \left(\frac{S_{P_t G_{tr}}}{P_t G_{tr}}\right)^2 + \left(\frac{S_{G_{(\varphi)}^2}}{G_{(\varphi)}^2}\right)^2 + \left(\frac{S_{C^2}}{C^2}\right)^2 + 16 \left(\frac{S_R}{R}\right)^2 + \left(\frac{S_\alpha}{\text{tg}\alpha}\right)^2 + \left(\frac{S_{\bar{P}'_n}}{P^I - \bar{P}'_n}\right)^2. \quad (3)$$

式中斜距  $R$  可以测量得非常精确,  $S_R/R$  接近零,可以忽略不计。一般的 SAR 系统设计中,由入射角误差引起的误差项  $(S_\alpha/\text{tg}\alpha)^2$  约为  $10^{-5}$  量级。图像热噪声平均功率  $\bar{P}'_n$  的测量是用关闭发射机时得到的热噪声图像进行测量,准确度较高;再除以信噪比,然后平方,其值也将小到可以忽略。因此,星载 SAR 辐射定标中的主要任务是对前三项误差,即收发通道增益、天线方向图增益和成像处理增益,进行测量和补偿。

收发通道增益由内定标方法测量,其误差主要决定于内定标回路中无源器件的电常数测量误差,即主要决定于具体 SAR 内定标系统的设计和实现精度。天线方向图增益由外定标的方法测得,常用的方法有两种:一种是对具有均匀雷达后向散射率的面目标,如热带雨林,

进行成像处理; 另一种是对按均匀间隔分布在一条距离线上的一组已知雷达截面积 (RCS) 的定标器对天线增益进行定标。本文主要对成像处理器增益进行了计算机仿真研究, 内定标和天线定标的研究内容不在本文讨论范围之内。

### 3 基于 CS 算法的成像处理器的增益计算

#### 3.1 CS 算法成像处理器增益公式推导

为清楚地表示出成像处理中的增益过程, 图 1 给出了星载 SAR 成像处理器的 CS 算法的简化流程。在处理流程中, 第一相位项是 Chirp 扰动项, 用于距离迁移曲线的对齐, 不产生增益。第二相位项进行距离压缩, 第三相位项进行方位压缩, 引入压缩增益和加窗增益。如果进行多视处理, 还有多视处理增益。

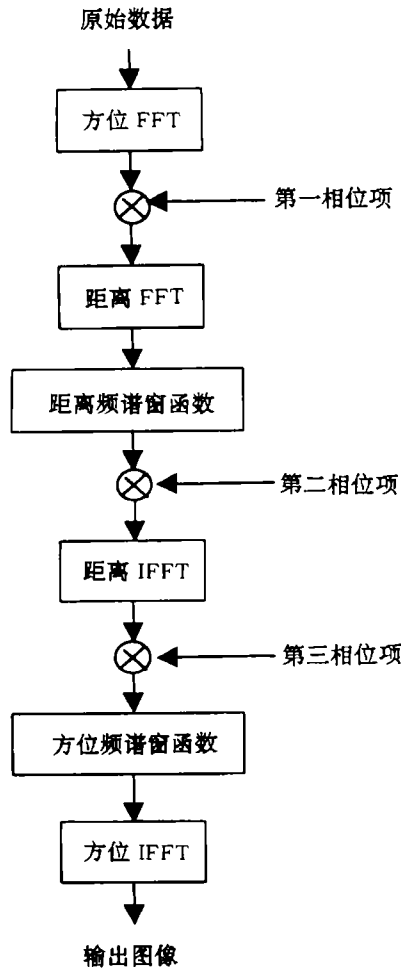


图 1 基于 CS 算法的 SAR 成像处理流程图

成像处理器定标就是精确地计算处理器的总增益  $C$ , 它是距离压缩增益  $C_r$ 、方位压缩增益  $C_a$ 、距离加窗增益  $W_r$  和方位加窗增益  $W_a$  的函数, 即

$$C = C_r C_a W_r W_a / C_1, \quad (4)$$

其中  $C_1$  为成像处理程序中引入的增益控制因子, 以便对成像处理的中间存储数据幅度进行控制。

(1) 距离压缩信号幅度增益  $C_r$  本处理器中采取的匹配滤波器为频域中产生的幅度归一化匹配滤波器, 其频谱为

$$H(f) = \exp[-j(\pi/4)\text{sgn}(k)] \exp[j\pi f^2/k], \quad (5)$$

匹配滤波产生的增益为  $C_r = \tau_p |k|^{1/2}$ ,  $\tau_p$  为发射信号时宽,  $k$  为发射信号调频率。

上述增益公式是在时间连续信号的基础上推导得到的, 而计算机处理中采用的是数字信号处理技术, 因此压缩增益需要重新计算。实际上, 经过简单推导不难发现, 在频域中产生的数字距离压缩滤波器的增益仍为  $\tau_p |k|^{1/2}$ 。

(2) 方位压缩信号幅度增益  $C_a$  与距离压缩增益的计算相同, 方位压缩信号的幅度增益为

$$C_a = T |f_r|^{1/2} = B_a |f_r|^{-1/2}, \quad (6)$$

其中  $T$  为多普勒信号时宽,  $f_r$  为多普勒调频率,  $B_a$  为多普勒信号带宽。

(3) 距离向窗函数增益  $W_r$  对于距离回波信号, 其频谱近似为矩形, 匹配滤波器的频谱也是矩形, 因此距离窗函数的增益为

$$W_r = \sum_{n=-m}^m \text{WIN}_r(m) / (2m), \quad (7)$$

其中 WIN 为窗函数, 其长度为  $2m$ 。

(4) 方位向窗函数增益  $W_a$  由于方位向频谱受到天线方向图调制, 频谱形状不再是矩形, 因此方位向窗函数增益的计算有所不同。但如果将天线方向图调制也看成窗函数, 则窗函数的增益为

$$W_a = \sum_{n=-m}^m \text{WIN}_a(m) / (2m), \quad (8)$$

其中窗函数 WIN 的长度为  $2m$ 。然而实际当中很难准确得知二维天线方向图, 因此方位向的天线增益 (可以包括额外的加窗处理增益) 需要通过外定标测量。

### 3.2 计算机仿真研究

由于该成像算法中未补偿三次以上的距离迁移项和四次以上的方位向相位, 以及存在量化误差, 成像处理器增益计算公式 (4) 与实际的处理增益之间仍存在微小误差。为了验证该公式的有效性, 我们采用均匀面目标仿真数据进行了实验。该仿真数据的每个像素单元内均匀分布 9 个 RCS 相同但反射相位不同的点, 数据大小是  $1024 \times 1024$ 。以该仿真数据作为原始数据, 经过图 1 所示的 CS 成像算法处理得到了一幅  $100$  像素  $\times 100$  像素的均匀面目标图像。该图像像素值的统计平均与面目标平均雷达后向散射率仿真值的比值的算术平方根为成像处理器增益测量值。

表 1 列出了几种多普勒中心频率误差和方位二次相位误差情况下的实验结果。表中成像处理器增益计算值由 (4)~(8) 式直接计算得到。处理器增益计算精度为成像处理器增益计算值与测量值的比值。由表 1 可见上述推导的成像处理器增益计算公式是有效的, 可用于辐射定标中的成像处理器增益定标, 定标误差小于  $0.15\text{dB}$ 。

表 1 成像处理器增益仿真研究结果

多普勒中心 频率误差 $\Delta f_{dc}$ (Hz)	方位二次 相位误差 (rad)	成像处理器增 益计算值	成像处理器 增益测量值	处理器增益 计算精度 (dB)
0	0	268.56	266.40	0.07
50	0	268.56	265.88	0.087
0	$0.75\pi$	268.56	265.58	0.097
10	$0.75\pi$	268.56	266.10	0.08
50	$1.5\pi$	268.56	264.57	0.13

#### 4 误差分配

根据 (3) 式, 若整个星载 SAR 系统的辐射定标的精度指标为  $\leq 1\text{dB}$ , 即

$$10\lg \frac{\sigma^0 + S_{\sigma^0}}{\sigma^0} \leq 1\text{dB}. \quad (9)$$

又根据以上计算机仿真研究结果, CS 算法成像处理器增益校正误差小于  $0.15\text{dB}$ , 可以导出:

$$\left(\frac{S_{P_t G_{tr}}}{P_t G_{tr}}\right)^2 + \left(\frac{S_{G_{(\varphi)}}^2}{G_{(\varphi)}^2}\right)^2 + 16 \left(\frac{S_R}{R}\right)^2 + \left(\frac{S_\alpha}{\text{tg}\alpha}\right)^2 + \left(\frac{S_{\bar{P}'_n}}{P^I - \bar{P}'_n}\right)^2 \leq 0.06581 \quad (10)$$

在第 2 节中已指出 (3) 式中右边的后三项的贡献可以忽略, 因此, 上式中  $0.06581$  的误差基本上来自前两项, 即发射功率与收发通道增益之积和双程天线增益的总的测量误差应小于  $0.99\text{dB}$ 。可见, 成像处理器增益计算误差对整个系统辐射定标精度影响不大。

若把剩余的误差平分, 得到

$$10\lg[(P_t G_{tr} + S_{P_t G_{tr}})]/(P_t G_{tr}) \leq 0.72, \quad (11)$$

$$10\lg[(G_{(\varphi)}^2 + S_{G_{(\varphi)}^2})]/(G_{(\varphi)}^2) \leq 0.72. \quad (12)$$

据此, 我们得到, 为了达到优于  $1\text{dB}$  的辐射定标精度, 内定标得到的发射功率与收发通道增益之积的精度, 以及由外定标得到的双程天线增益的精度都应优于  $0.72\text{dB}$ 。

#### 5 结 论

本文对星载 SAR 系统辐射定标的各项误差因素进行了全面的分析, 提出了计算系统辐射定标误差的公式, 研究表明斜距、入射角和系统热噪声的测量误差对辐射定标误差的贡献非常小, 可以忽略。辐射定标的误差主要来自内定标测量收发通道增益、外定标测量天线方向图和成像处理器增益计算的误差; 推导了基于 CS 算法的成像处理器的增益的精确计算公式, 并通过计算机仿真实验进行了验证; 得出了成像处理器增益计算精度优于  $0.15\text{dB}$ , 成像处理器增益计算误差对整个 SAR 系统辐射定标精度影响不大的结论。这些结论对于设计和实现含辐射定标的星载 SAR 系统具有参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] Zink M, Bamler R. X-SAR radiometric calibration and data quality. IEEE Trans. on GRS, 1995, GRS-33(4): 840-847.
- [2] Srivastava S K, *et al.* RADASAT Image quality and calibration results. Proc. IGARSS '97, Singapore: Aug. 1997, 1182-1185.
- [3] Freeman A, *et al.* SAR-C Data quality and calibration results. IEEE Trans. on GRS, 1995, GRS-33(4): 848-857.
- [4] Lukowske T I, *et al.* Spaceborne SAR calibration studies: ERS-1. Proc. IGARSS' 94, Pasadena, CA, USA: August, 1994, 2218-2220.
- [5] Freeman A. SAR Calibration: An overview. IEEE Trans. on GRS, 1992, GRS-30(6): 1107-1119.
- [6] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991, 310-369.

ANALYSIS OF ERROR IN RADIOMETRIC CALIBRATION  
FOR SPACEBORNE SAR AND CALCULATION OF  
IMAGING PROCESSOR GAIN

Peng Jiangping    Ding Chibiao    Peng Hailiang

*(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)*

**Abstract** Various factors leading to error in spaceborne SAR radiometric calibration are discussed, and an equation to estimate the radiometric calibration error is proposed. The equation for calculating SAR imaging processor gain based on chirp scaling algorithm is derived, and testified through computer simulation experiments. A quantitative conclusion on the contribution of imaging processor gain to SAR radiometric calibration error is obtained.

**Key words** Spaceborne SAR, Radiometric calibration, Chirp-scaling algorithm, Imaging processor gain

彭江萍: 女, 1974年生, 硕士研究生, 信号与信息处理专业.

丁赤飏: 男, 1969年生, 博士, 副研究员, 合成孔径雷达信号处理.

彭海良: 男, 1939年生, 研究员, 博士生导师, 雷达系统和信号处理, 微波遥感技术.