

## 基于时域的低频 UWB SAR 辐射校正

邹 鲲 梁甸农

(国防科技大学电子科学与工程学院超宽带实验室 长沙 410073)

**摘要:** 低频 UWB SAR 系统校准的关键问题是获得定标体精确的散射特性和建立合适的信息处理模型。本文利用 MOM 和渐近波形估计(AWE)方法得到随频率和方位角变化的角反射器 RCS, 建立了基于时域聚焦算法的校正模型, 最后利用计算机仿真验证了该方法的有效性。

**关键词:** 低频超宽带合成孔径雷达, 天线方向图, 校准

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)09-1379-04

## Calibration for Low Frequency UWB SAR Based on Time Domain

Zou Kun Liang Dian-nong

(UWB LAB, School of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha 410073, China)

**Abstract** The key problem of calibration for low frequency ultra wide band synthetic aperture radar system is the acquisition of the scattering information of calibrators and suitable signal processing model. In this paper, the RCS of trihedral triangle reflector changing with the frequency and aspect angle is obtained using method of moment and AWE method, and the calibration model is proposed based on time domain. The computer simulation is used to verify this calibration method, and result is agreed with the theory analysis.

**Key words** Low frequency UWB SAR, Antenna pattern, Calibration

### 1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有全天候, 全天时的观测能力, 是当今主要的遥感手段之一<sup>[1]</sup>。工作在 UHF/VHF 波段的低频超宽带(Ultra Wide Band, UWB)合成孔径雷达利用电磁波在低频段具有的穿透能力, 实现对叶簇覆盖目标和地表以下浅层目标成像; 同时利用发射信号的大时宽-带宽积(Time width-Band width Product, TBP)和大处理角获得图像高分辨率<sup>[2]</sup>。因此低频 UWB SAR 在空难搜救, 军事侦察等领域有着极其重要的意义。

随着 SAR 技术的研究和应用的深入, 人们不再满足仅实现对地物成像, 而要求获得的数据可以准确地和精确地表征地物散射特性。然而由于各种误差的存在, SAR 图像和地物散射特性的对应关系只能建立在统计意义之上<sup>[1-3]</sup>。去除和减小各种误差对系统的影响, 就可以使 SAR 图像更精确和更准确地表征地物散射特性, 提高系统的精确度和准确度。

为了实现 UWB SAR 系统的精确校准, 有两个方面必须着重考虑, 首先是在 UWB SAR 辐射校准过程中使用的定标体的散射特性随着方位角度和距离频率而变化, 而在普通窄

带 SAR 系统中, 定标体的散射特性可以认为是常数。其次必须建立适合 UWB SAR 系统工作原理的系统处理模型。经过几十年的发展, 普通小 TBP 小处理角 SAR 系统得到了深入的研究, 该系统模型也得到了充分的讨论。而对于 UWB SAR 而言, 大 TBP 发射信号和大处理角特性使得原先的窄带 SAR 模型不再适用, 同时目标的散射特性必须在模型中加以考虑。

本文针对机载条带式工作在 UHF 波段的低频 UWB SAR 系统, 在第 2 节讨论了定标体的散射特性; 在第 3 节结合定标体散射特性建立了基于时域的 UWB SAR 系统处理模型; 在第 4 节对系统辐射校正进行了计算机仿真。

### 2 定标体的散射特性

对于通常的高频窄带 SAR 辐射校正中使用的定标体, 如角反射器, 其尺寸通常为雷达工作波长的数十倍, 散射特性可以用高频散射模型进行计算。而由于系统发射信号的窄带特性和天线的窄波束特性, 定标体的散射特性通常可以近似为常数。对低频 UWB SAR 进行辐射校正, 角反射器的尺寸通常与系统工作波长相接近, 其散射特性难以满足高频散射特性。系统的大 TBP 和大处理角特性使得定标体 RCS 随

频率和方位角的变化不能够忽略。

由于散射体的尺寸与入射波长相近,属于谐振散射<sup>[6]</sup>,必须求解 Stratton-Chu 积分方程才可以获得散射体表面的感应电流。利用矩量法(Method Of Moment, MOM)将积分方程转换成矩阵方程,可以得到较为精确的数值解。求解的步骤首先将散射体表面用三角形子面元剖分,子面元的尺寸要求小于 1/5 到 1/10 个波长,才能获得精确数值解。再将散射体表面电流用 RWG 基函数展开,代入 Stratton-Chu 积分方程后可以得到

$$\mathbf{ZI} = \mathbf{V} \quad (1)$$

其中  $\mathbf{Z}$  表示广义阻抗,它与各个子面元的几何形状,子面元之间的电位和相互位置有关。 $\mathbf{V}$  表示广义电压,它表示各个子面元上的入射场。 $\mathbf{I}$  表示散射体表面电流。散射体表面的感应电流的详细求解可以参见文献[7]。求得了散射体感应电流后,就可以很容易得到散射场和目标的 RCS。

$$\mathbf{E}^s(\mathbf{R}) = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi R} \exp(-jkR) \iint_S \mathbf{J}(\mathbf{r}') \exp(j\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}') dS \quad (2)$$

$$\text{RCS} = 4\pi \cdot \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \cdot \frac{|\mathbf{E}^s|^2}{|\mathbf{E}^i|^2} \quad (3)$$

MOM 方法的关键在于推导广义阻抗  $\mathbf{Z}$ ,它是入射波频率的函数。对每一给定的频率,都要进行一次计算。而在计算  $\mathbf{Z}$  的过程中,计算量近似与子面元个数的平方的正比,而要提高数值计算的精确性,需要将散射体表面剖分更多的子面元,从而使得计算  $\mathbf{Z}$  极为耗时。而对定标体进行散射建模,必须考虑散射模型随频率变化特性,这就要求在每个频点上重复计算广义阻抗。对于这个问题,渐进波形估计(AWE)技术是一种很好的方法<sup>[8]</sup>,它首先是应用在 VLSI 电路互联结构和微波器件的宽频带响应的计算等方面,在估计 RCS 宽带宽角度响应方面能取得较好的结果。AWE 技术只需要计算一个频点上的散射特性,利用 Taylor 级数展开的方法获得在整个频带内的散射特性。由于广义阻抗与入射波角度无关,因此在考虑目标散射特性与角度的关系时,只要改变不同入射角度条件下的  $\mathbf{V}$  反复利用式(1)就可以获得目标散射特性与角度的变化关系。AWE 技术也可以应用到求解 RCS 与角度变化关系。

图 1 给出了斜边长度为 1m 的金属三面角反射器 RCS 随频率、入射角度的变化关系。需要说明的是,RCS 随角度变化特性变换到随雷达沿运行轨迹的变化特性,这样做是为了更容易应用到系统模型中去。这里假设雷达波束下视角为 45°。利用 AWE 技术建立散射模型,仅用 Taylor 级数展开的方法很难在较宽的频带或较宽的角度内有良好的收敛效果,从图 1 中可以看到仅利用 Taylor 级数展开方法得到的曲线只能在较小的范围内和理论值吻合。因此应用有理分式逼

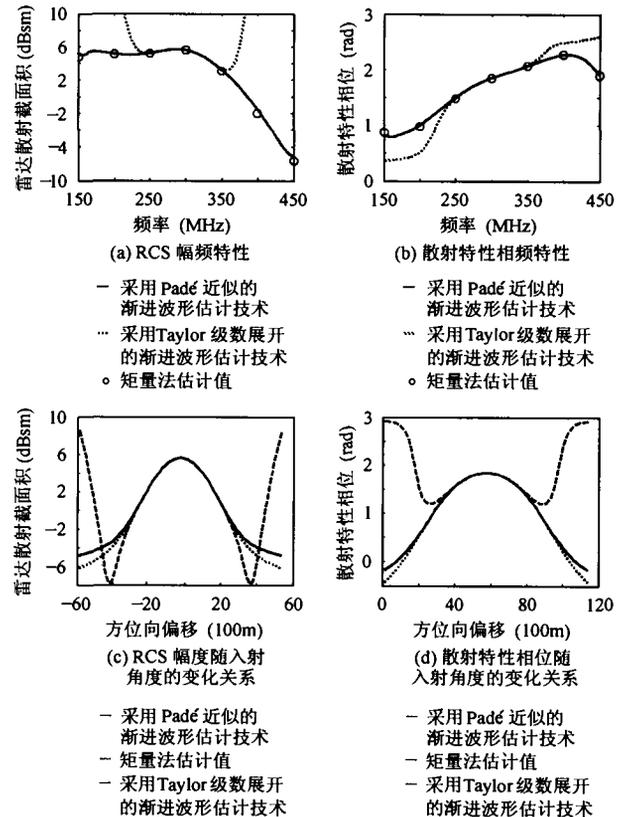


图 1 三面角反射器 RCS 的频率和角度响应

近的方法(Padé近似)可以获得在宽频带和宽角度下的收敛能力。关于利用 AWE 技术计算 RCS 的宽带和宽角度特性的方法可以参考文献[8]。

### 3 基于时域的系统处理模型

SAR 的信息处理模型通常建立在各种成像算法的基础之上。由于 UWB SAR 具有较大的处理角,距离迁徙远大于一个距离分辨单元,从而导致了点目标回波的方向向和距离向的耦合不能够忽略,普通窄带 SAR 回波模型中的雷达与目标距离的非涅尔近似不再成立,而演化成双曲特性(参见图 2)。如果仍沿用普通窄带 SAR 成像算法,如距离-多普勒算法,必然会导致 SAR 图像严重畸变。针对 UWB SAR 的特点的成像算法在频域上为距离迁移算法<sup>[9]</sup>,亦称  $\omega-k$  算法。基于  $\omega-k$  算法的频域信息处理模型是目标散射系数沿距离向的 Fourier 变换和沿方位向的 Hankel 变换。时域算法通常称为后向投影算法<sup>[10]</sup>,简称 BP(Back-Project)算法。本文建立了基于 BP 算法的时域数学模型。

假定系统为机载条带式 SAR 系统,发射信号为 UWB 线性调频信号。参考点目标位于合成孔径中心处,则接收信号经过正交解调和距离向匹配滤波后得到<sup>[11]</sup>

$$S_c(\omega, u) = |P(\omega)|^2 H(\omega, s_0, y_0 - u) \cdot \exp(-j2k\sqrt{s_0^2 + (y_0 - u)^2}) \quad (4)$$

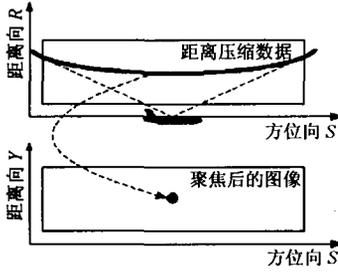


图2 聚焦前后的对应几何关系

其中  $P(\omega)$  表示发射信号频谱,  $H(\omega, s_0, y_0 - u)$  是目标和雷达天线的非理想性以及电波传播影响的总和, 它是信号频率和雷达与目标相对位置的函数。对于 UWB SAR 系统,  $H$  随频率和方位角的变化不能够忽略,  $H$  可以表示为

$$H(\omega, s_0, y_0 - u) = H_A(\omega, s_0, y_0 - u) \cdot H_{Cal}(\omega, s_0, y_0 - u) \quad (5)$$

其中  $H_A$  表示雷达天线和电波传播效应的总和,  $H_{Cal}$  表示定标体 RCS 是频率和方位角的函数, 它可以通过上节介绍的方法获得。因此对 UWB SAR 的辐射校正的核心问题就是如何估计出  $H_A$  的值, 从而能够在成像处理过程中进行补偿。利用驻留相位原理并利用大 TBP 信号时域和频域相互锁定<sup>[12]</sup>的特点, 可以得到

$$s_c(t, u) = \text{psf}(t - \frac{2}{c}\sqrt{s_0^2 + (y_0 - u)^2}) \cdot H(\alpha t, s_0, y_0 - u) \quad (6)$$

其中  $\text{psf}(\cdot)$  表示目标的点扩展函数, 其峰值在二维时间域中延一条正侧双曲线排列。时域聚焦算法就是沿着这条双曲线进行同相叠加得到点目标图像<sup>[10]</sup>:

$$D_c(\alpha, \beta) = \int_{L2(\alpha, \beta)} s_c(t, u) \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\beta^2 + (u - \alpha)^2}) dl \quad (7)$$

其中积分曲线:

$$L2(\alpha, \beta): \left(\frac{Ct}{2}\right)^2 - (u - \alpha)^2 = \beta^2 \quad (8)$$

为了对  $H$  进行估计, 可以在时域聚焦过程中进行加权同相叠加, 加权因子可以用 LMS 估计

$$D_c(\alpha, \beta) = \int_{L2(\alpha, \beta)} s_c(t, u) H_{LMS}(\alpha, \beta; t, u) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\beta^2 + (u - \alpha)^2}\right) dl \quad (9)$$

在 LMS 估计算法中, 期望选择为理想条件下的点目标图像, 所谓理想条件是指目标和雷达的辐射方向图为全方向的, 并且不随频率变化。  $H_A$  可以用加权因子表示:

$$H_A = \frac{1}{H_{Cal} H_{LMS}} \quad (10)$$

通过上面的分析可以得出, 利用基于时域聚焦的方法估计加权因子, 可以获得  $H_A$  的估计值。利用获得的  $H_A$  的估计值,

就可以实现对 SAR 图像进行校准。

$$D(\alpha, \beta) = \int_{L2(\alpha, \beta)} s(t, u) \frac{1}{H_A} \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\beta^2 + (u - \alpha)^2}\right) dl \quad (11)$$

其中  $s(t, u)$  表示待校正的距离向脉冲压缩数据, 利用式(11)进行加权叠加实现时域叠加, 其中加权因子  $1/H_A$  正好可以补偿由于天线和电波传播误差造成的畸变, 从而实现校准。其中估计方法的推导和估计效果的分析在文献[13]中有详细论述。

#### 4 辐射校准仿真试验

仿真试验的参数如表 1 所示。采用的参数来源于机载 UWB SAR。在这里假定系统发射机输出功率始终不变, 得到的回波数据经过了运动补偿。

表 1 计算机仿真试验参数

计算机仿真试验参数	
中心频率	600MHz
工作带宽	275MHz
LFM 宽度	0.3μs
波束角	30°
天线方向图	高斯函数
雷达与目标最近距离	7000m
雷达运动速度	100m/s
脉冲重复频率	1000Hz
雷达与地面高度	4200m
方位向分辨率	约 0.5m

仿真试验通过表 1 中的参数, 模拟产生一个无杂波条件下不考虑天线非均匀影响的理想点目标以及 SCR=40dB 条件下的受天线非均匀性影响的角反射器图像。通过前面的分析方法, 得到加权因子  $1/H_A$ 。天线方向图如图 3(a)所示, 校准因子如图 3(b)所示。可以看出, 估计的因子在天线方向图倒数的附近变化, 这种随机变化是由于估计误差决定的。从估计值的变化可以看出靠近天线方向图变化较为剧烈的位置的估计因子的估计方差较大, 天线方向图中心处的变化平坦, 对应的估计因子的估计方差较小。对于估计方差较大的部分可以通过多项式拟合得到变化较为平坦的结果。

为了对真实场景进行仿真, 设计 3 个理想点目标 A, B 和 C 如图 4 所示, 3 个点目标的雷达散射截面积之间的关系为  $\sigma_A = 2\sigma_B = \sigma_C$ 。其中目标 A 和 B 平行于飞行轨迹放置。图 4(a)表示理想条件下时 3 个点目标的图像。图 4(b)表示由于天线非均匀性, 导致目标沿方位向分辨率下降。A 和 B 两

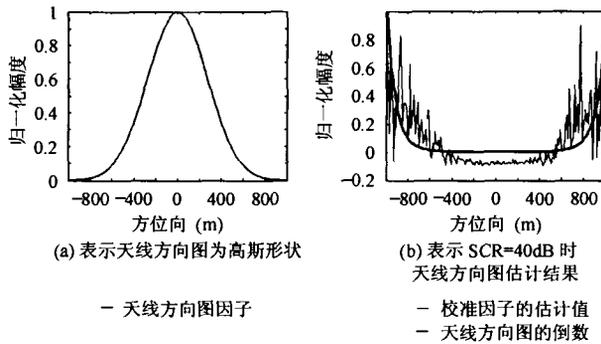


图3 天线方向图和估计结果

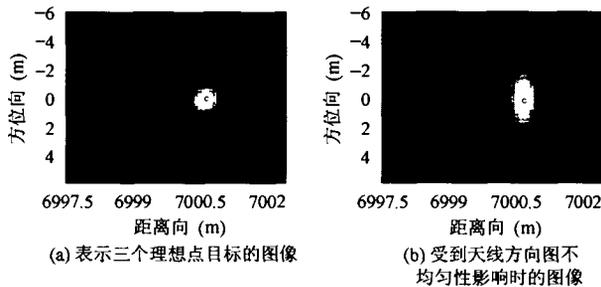


图4 点目标图像

个目标由于处于同一距离线上，两目标的图像产生了重叠。

利用得到的校准因子，对图4(b)中3个目标在SCR=40dB和20dB两种条件下的校准效果进行了对比。如图5所示。校准效果的对比分析参见文献[13]，从而验证了该校准方法的有效性。从图5可以看出，利用该算法，可以移除天线方向图非理想特性对图像质量的影响，实现目标方位向聚焦。

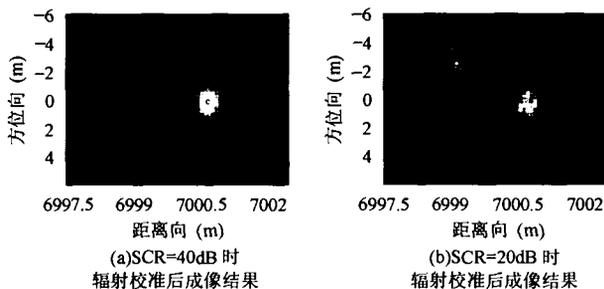


图5 不同信噪比条件下的校准效果

## 5 结束语

系统的校准是一项复杂的工程，需要考虑的因素很多，本文主要针对低频UWB SAR系统，其主要区别与其他常规SAR系统的特点是超宽带特性和低频特性。因此对低频UWB SAR进行精确的辐射校正，关键是要获得定标体精确的后向散射信息和合适的信息处理模型。其核心就是补偿天线和电波传播等引入的畸变影响。本文首先利用MOM和AWE获得定标体低频散射特性的数值解，然后建立了适于

UWB SAR信息处理的时域信息处理模型，利用该模型估计出校准因子，从而实现UWB SAR系统校正。

## 参考文献

- [1] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic aperture radar system and signal processing. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1991: 323 - 364.
- [2] Norbert G, Ressler M A, Carin L. Wide-band VHF scattering from a trihedral reflector situated above a lossy dispersive halfspace. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2609 - 2617.
- [3] Freeman A. SAR calibration: an overview. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(6): 1107 - 1121.
- [4] Dobson M C, Ulaby F T, Brunfeldt DR, et al.. External calibration of SIR-B imagery with area extended and point targets. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, 24(4): 453 - 460.
- [5] Larson R W, Jackson P L, Kasischke E S. A digital calibration method for synthetic aperture radar system. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(6): 753 - 763.
- [6] E. F. 克拉特著，阮颖铮译. 雷达散射截面-估计、测量和减缩. 北京: 电子工业出版社, 1988, 第二章.
- [7] Rao S M, Wilton D R, Glisson A W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1982, 30(2): 409 - 418.
- [8] Cockrell C R, Beck F B. Asymptotic waveform evaluation (AWE) technique for frequency domain electromagnetic analysis, NASA Technical Memorandum 110292, 1996.
- [9] Milman A S. SAR Imaging by wk migration. *Int. J. Remote Sensing*, 1993, 14(10): 1965 - 1979.
- [10] McCorkle J W. Focusing of synthetic aperture ultra wide-band data. Proc. IGARSS'89, Vancouver, 1989: 1 - 5.
- [11] Soumekh M. Reconnaissance with UWB SAR. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1995, 12(4): 21 - 40.
- [12] 刘永坦. 雷达成像技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业出版社, 1999, 第四章.
- [13] 邹鲲, 梁甸农. 低频UWB SAR天线方向图校准算法. 信号处理, 2005(4).

邹鲲: 男, 1976年生, 博士生, 研究方向为低频超宽带SAR辐射校准、极化校准.

梁甸农: 男, 1936年生, 博士生导师, 教授, 中国电子学会会士, 主要研究方向为超宽带雷达系统理论及自适应信号处理、现代谱估计.