

基于频域的低频 UWB SAR 极化校准

邹 鲲 梁向农

(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 多极化, 低频超宽带(Ultra Wide Band, UWB)合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是雷达技术未来发展的一个重要方向。系统的低频特性, UWB 特性和大处理角特性使得常规 SAR 极化校准不再适用。该文基于多极化低频 UWB SAR 频域处理模型, 考虑了极化校准中定标体的低频超宽带电磁散射特性的问题, 给出了极化校准方法。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, 极化校准, 电磁散射模型

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)07-1219-04

Polarimetric Calibration for Low Frequency UWB SAR Based on the Frequency Domain

Zou Kun Liang Dian-nong

(School of Electronic Science and Technology, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract Multi-polarization, low frequency Ultra Wide Band Synthetic Aperture Radar (UWB SAR) is one of the most important aspects of the radar technology. The low frequency, UWB and large processing angle result that the polarimetric calibration for regular SAR system cannot be used. In this paper, based on the frequency-domain processing model of the multi-polarization, low frequency UWB SAR system, with the consideration of the low frequency UWB electromagnetic scattering characteristics of the calibrators, the polarimetric calibration method is proposed. The computer simulation is used to validate the method.

Key words Low frequency UWB SAR, Polarimetric calibration, Electromagnetic scattering model

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)利用相干叠加原理实现地物的二维成像, 它包含数据获取和数据处理两个子系统。而SAR系统的校准是数据的获取和处理之间必不可少的环节^[1]。校准的根本目的就是减少数据获取过程中的不确定性或补偿某种确定性的偏差, 从而提高数据处理输出的精确度和准确度。

SAR 技术正向着多极化, 多频段方向发展, 而多极化低频 UWB SAR 是未来 SAR 技术发展的一个重要方向。系统利用多极化特性可以获得地物更多的散射信息, 利用低频特性可以探测被叶簇覆盖的隐蔽目标, 利用超宽带特性获得距离向高分辨率, 利用大处理角特性(由系统的低频特性衍生而来)获得方位向高分辨率。但是这些特性使得基于常规高频窄带 SAR 的校准技术不再适用, 探讨适于该系统的校准技术是非常必要的。SAR 系统的校准通常包括辐射校准和极化校准等, 关于低频 UWBSAR 辐射校准的讨论可以参考文献 [2,3]。本文主要讨论系统的极化校准。

低频 UWBSAR 系统原理较常规 SAR 更复杂, 在第 2 节给出了该系统的频域信息处理模型, 它是后续讨论的基础。定标体散射特性是 UWB SAR 系统校准中必须考虑的问题, 在第 3 节给出了电磁频域散射特性的计算方法。在第 4 节利用定标体散射特性和系统模型, 给出了极化校准方法。

2 低频 UWBSAR 信息处理模型

低频 UWB SAR 的几何模型如图 1 所示, 它与常规 SAR 是相同的, 而它们的主要区别来源于系统参数的不同。低频 UWB SAR 系统具有更大的方位向波束张角, 因此目标的多普勒历史(回波延迟相位)不能简单地进行二阶近似, 即目标方位向信号不是严格的线性调频信号。同时天线方向图和目标散射特性随方位角的变化不可以近似为常量。系统的 UWB 特性使得天线方向图和目标散射特性随频率的变化也不可以忽略。因此低频 UWB SAR 系统的信息处理模型比常规 SAR 更加复杂。多极化 SAR 系统通常是多通道处理。本节先考虑某一种极化组合方式下的回波模型, 它很容易应用到多通道处理模型中去。

投影。雷达沿Y轴正方向匀速运动，并以一定的频率(脉冲重复频率)沿X轴正方向发射信号。虽然在雷达发射和接收脉冲回波过程中，雷达一直在运动，但通常可以近似为“停-走-停”模式。当雷达位于 $(0, u)$ 处时，雷达接收的回波的频域表达式为^[4]

$$S^{MN}(k_u, \omega) = P(\omega) E^{MN}(\omega) \sum_n A_n^{MN}(k_u, \omega) A_n^{MN}(k_u, \omega) \cdot \exp\left(-j\sqrt{4k^2 - k_u^2}x_n - jk_u y_n\right) \quad (1)$$

其中上标MN表示发射为M极化方式，接收为N极化方式。 $P(\omega)$ 表示发射信号的频谱， $E(\omega)$ 表示通道MN的频率畸变，它可以通过辐射校准进行补偿，具体方法参见文献[2]。 $A_n^{MN}(k_u, \omega)$ 表示天线辐射方向图，它也可以通过某些方法进行估计和补偿，具体方法可以参见文献[3]。本文主要考虑各个通道经过辐射校准之后的数据。 $A_n^{MN}(k_u, \omega)$ 表示通道MN目标的二维频域的辐射方向图，而通常目标的辐射方向图是方位角和频率的二维函数，即 $a_n^{MN}(\theta_n, \omega)$ 。其中方位角 θ_n 的定义参见图1所示。 $a_n^{MN}(\theta_n, \omega)$ 与二维频域辐射方向图 $A_n^{MN}(k_u, \omega)$ 是映射关系：

$$\theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{y_n - u}{x_n}\right) \quad (2)$$

$$k_u = \frac{2\omega}{c} \sin \theta_n \quad (3)$$

因此，如果计算得到 $a_n^{MN}(\theta_n, \omega)$ ，可以利用式(2)，式(3)得到 $A_n^{MN}(k_u, \omega)$ 。

本文假设各通道回波经过了辐射校准和天线方向图的补偿，则对于多极化雷达，通常存在4种极化组合方式，利用式(1)将4种极化组合方式用矩阵表示：

$$S(k_u, \omega) = P(\omega) \sum_n \mathbf{R}(k_u, \omega) \mathbf{A}_n(k_u, \omega) \mathbf{T}(k_u, \omega) \cdot \exp\left(-j\sqrt{4k^2 - k_u^2}x_n - jk_u y_n\right) \quad (4)$$

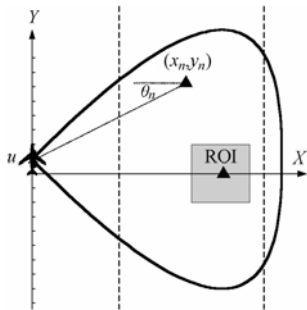


图1 低频UWB SAR几何关系

Fig.1 Geometric relationship of the low frequency UWB SAR

其中矩阵的表示方式为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{HH} & M_{HV} \\ M_{VH} & M_{VV} \end{bmatrix} \quad (5)$$

除了矩阵表示以外，与式(1)不同的是还引入了极化通道失真矩阵^[1]。其中 $\mathbf{R}(k_u, \omega)$ 表示接收极化通道失真矩阵， $\mathbf{T}(k_u, \omega)$ 表示发射极化通道失真矩阵。极化通道失真矩阵包含极化交叉项(Cross-Talk)和极化不平衡量(Imbalance)，具体定义参见文献[1]。由式(4)可知，极化校准的目的就是对通道失真矩阵的补偿。将式(4)进行矢量化后得到：

$$\bar{S}(k_u, \omega) = P(\omega) \mathbf{B}(k_u, \omega) \sum_n \bar{\mathbf{A}}_n(k_u, \omega) \cdot \exp\left(-j\sqrt{4k^2 - k_u^2}x_n - jk_u y_n\right) \quad (6)$$

其中 4×4 矩阵 $\mathbf{B}(k_u, \omega) = \mathbf{R}(k_u, \omega) \otimes \mathbf{T}(k_u, \omega)$ ，符号 \otimes 表示Kronecker积。可见极化校准的关键是寻找矩阵 $\mathbf{B}(k_u, \omega)$ 的逆。从式(6)可以看出，要对 $\mathbf{B}(k_u, \omega)$ 的逆进行估计必须知道目标的散射特性。

3 定标体散射建模

针对低频UWB SAR的校准处理，定标体的散射特性是必须进行考虑的^[2]，这是与常规SAR校准的一个显著区别。本节主要讨论定标体的电磁散射特性的建模问题，从而从理论上获得 $a_n(\theta, \omega)$ ，它是校准的前提。

目标的散射特性 $a_n(\theta, \omega)$ 的数值计算方法很多，考虑到目标的散射特性属于低频谐振散射范畴，采用矩量法(Method Of Moment, MOM)是一个较好的选择^[5]。矩量法很适合计算目标尺寸与波长相比拟时的频域散射特性。入射场通常是已知的谐变电场。散射场可以通过如下方程获得：

$$\mathbf{E}^s(\mathbf{R}) = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi\mathbf{R}} \exp(-jk\mathbf{R}) \iint_S \mathbf{J}(\mathbf{r}') \exp(j\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}') dS \quad (7)$$

方程中未知变量 \mathbf{J} 表示目标面电流密度。假定目标为理想导体，而理想导体表面切向电场为0，则电流密度满足以下方程

$$\mathbf{E}^s = -\mathbf{E}^i = -j\omega\mathbf{A} - \nabla\phi \quad (8)$$

其中矢量 \mathbf{A} 和标量 ϕ 分别为磁矢位和电位，都是散射体面电流密度的函数。利用方程可以求解出目标面电流密度。直接解方程是非常困难和乏味的，而数值计算方法在满足一定精度条件下适合计算机运算。将面电流密度离散化是数值计算的第一步。这里采用Rao等人提出的基函数^[6]，将目标表面用任意三角形分割。离散化的电流密度代入方程就可以得到以下的矩阵方程：

$$\mathbf{Z}\mathbf{I} = \mathbf{V} \quad (9)$$

其中 \mathbf{Z} 为广义阻抗， \mathbf{I} 和 \mathbf{V} 分别为广义电流和广义电压。广义电流表示离散化的面电流密度，广义电压表示入射场。而广义阻抗表示目标的自身几何特性。广义电流可以通过对两边右乘 \mathbf{Z}^{-1} 得到。具体求解过程参见文献[6]。MOM的计算精度与分割的细致程度成正比。而分割得越细，产生的广义阻抗矩阵就越大，导致求解其逆矩阵越困难。

在整个求解过程中,入射场为谐变电场,因此求得的散射场也是某一传播方向上的谐变电场。这说明利用MOM仅可获得在某一频率点和某一方向上的散射特性 $a_n(\theta, \omega)$ 。为了适应UWB SAR目标特性分析,必须获得目标在整个频带内和所有可能的入射角条件下的 $a_n(\theta, \omega)$ 。计算目标散射特性 $a_n(\theta, \omega)$ 的角度响应比较简单,因为式(4)中广义阻抗不是入射角的函数,不必反复求解广义阻抗的逆矩阵来求解广义电流。但是利用MOM求解目标散射特性 $a_n(\theta, \omega)$ 的频率响应则困难得多,因为广义阻抗是频率的函数,对每个频率点,必须重新求解广义阻抗,并进行求逆计算。为了提高计算效率,采用渐进波形估计(Asymptotic Waveform Evaluation, AWE)方法^[7],可以获得较好的效果。由于广义电流是频率的函数,求解广义电流在某个频率点上的各阶导数,并用Taylor级数展开的方法就可以获得宽带广义电流,从而求解目标散射特性 $a_n(\theta, \omega)$ 的宽带频率响应。利用Taylor级数展开的方法,得到的估计值收敛区间较小,不宜用来估计UWB散射特性,利用有理函数逼近的方法,如padé近似可以获得更大频率域范围内的电流估计值。该方法将Taylor展开系数用有理分式表示,其收敛区间得到较大的扩展,很适合计算超宽带RCS频率响应。

图2和图3分别为计算得到的边长为0.5m和1m角反射器散射特性 $a_n(\theta, \omega)$ 。其中虚线表示利用Taylor展开获得的估计值,粗实线表示利用Padé近似获得的RCS的估计值,图中的圆圈表示利用MOM得到对应频点的计算值。Taylor级数展开的方法在大约100MHz带宽内可以较为准确估计RCS宽带特性,而通过Padé近似扩大了RCS宽带特性的估计范围,在300MHz带宽范围内均可以得到与MOM较为吻合的RCS估计值。

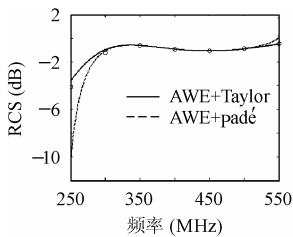


图2 0.5m角反射器
RCS幅频特性
Fig.2 Frequency-amplitude
RCS of the 0.5m reflector

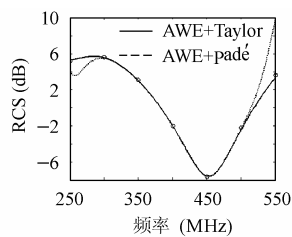


图3 1m角反射器
RCS幅频特性
Fig.3 Frequency-amplitude
RCS of the 1m reflector

4 低频UWBSAR极化校准

从式(6)中直接提取极化通道失真矩阵必须计算图像中每个目标的散射特性才可以对通道失真矩阵进行估计,如果可以获得单个目标的回波,则只需计算一个目标的散射特性,从而可以提高计算效率。本文采用的方法是对接收回波进行数字聚焦^[4],获得感兴趣区域(Region Of Interest, ROI)

内的定标体的回波,去掉ROI之外的目标回波。数字聚焦方法类似于去调频处理,将多普勒历史进行去调频后,得到的信号中存在若干点频信号,该信号的频率与目标的方位向坐标有关,可以通过滤波的方法,去除ROI沿方位向以外的目标回波。文献[4]只讨论了方位向的数字聚焦,其实沿距离向也有类似的方法,从而将沿距离向ROI以外的目标回波去掉。

图4,图5给出了数字聚焦方法在距离向和方位向的处理效果。图4为ROI内一个点目标,周围没有杂波。考虑极端情况,在ROI之外,该目标的距离向前后和方位向两边分别放置强干扰点目标,其散射强度比中心点目标高12dB。显然中心点目标的图像模糊不清,如图5所示。经过数字聚焦处理后,可以滤除ROI之外的干扰目标对于回波的贡献,成像结果如图6所示。目标的图像较图4有一定的失真,但是相对于数字聚焦处理前的图5,图像质量有了很大的提高。

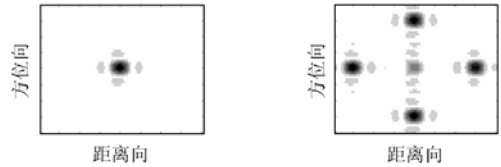


图4 单个点目标图像
图5 受到干扰后的图像
Fig.4 Single point target
Fig.5 Sufered by interference

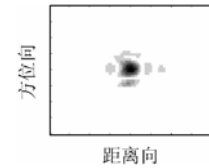


图6 数字聚焦处理后的点目标图像
Fig.6 After digital focusing processing

假设ROI中只有一个参考目标,目标坐标为 (x_0, y_0) 。通过二维的数字聚焦处理之后,式(6)就可以近似表示为

$$\bar{S}(k_u, \omega) \approx P(\omega) \mathbf{B}(k_u, \omega) \bar{A}_0(k_u, \omega) \cdot \exp\left(-j\sqrt{4k^2 - k_u^2}x_0 - jk_u y_0\right) \quad (10)$$

由于 $\bar{S}(k_u, \omega)$ 是可以测量的,而目标散射特性 $\bar{a}_0(\theta_0, \omega)$ 可以利用第3节的方法计算出来,利用式(2),式(3)的映射关系可以得到 $\bar{A}_0(k_u, \omega)$ 。因此利用式(10)就可以实现对 $\mathbf{B}(k_u, \omega)$ 的逆的估计了。对式(7)回波的极化校准可以表示为

$$\bar{S}_C(k_u, \omega) = \mathbf{B}^+(k_u, \omega) \bar{S}(k_u, \omega) \quad (11)$$

其中 $\mathbf{B}^+(k_u, \omega)$ 表示矩阵 $\mathbf{B}(k_u, \omega)$ 的广义逆,通常可以利用Tikhonov正则化方法得到。

利用计算机仿真,可以验证该校准方法的有效性。假设系统中心频率为400MHz,频带范围250~550MHz,采用机载SAR的成像参数,对一理想点目标进行成像。极化通道失真矩阵主要考虑来自UWB天线系统,数据来源于国防科技大学电子科学与工程学院超宽带雷达天线测量结果^[8]。

极化校准前后的结果对比如图7所示。由于两种极化方

式的天线之间存在耦合,各个极化通道之间存在不平衡量和交调项。因此导致点目标回波的相位失真,图像出现散焦现象。利用极化校准模型,可以得到聚焦良好的点目标图像。

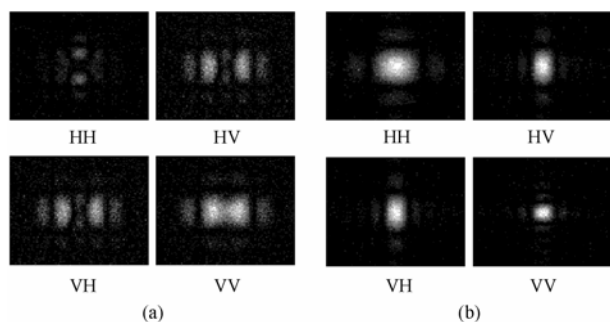


图7 极化校准的前后对比

(a)表示极化校准前的图像 (b)表示极化校准后的图像

Fig.7 Comparison result

(a)Images before polarimetric calibration

(b) Images after polarimetric calibration

5 结束语

针对多极化,低频 UWB SAR 的极化校准技术目前研究较少,而常规 SAR 的极化校准技术难以适用,因此发展和研究针对该系统的极化校准技术是十分必要的。本文首先建立系统频率域极化模型,利用电磁数值建模方法计算定标体的低频 UWB 和宽角度的频域散射特性,利用二维数字聚焦方法,提高计算效率,从而实现了对该系统的极化校准。

- [1] Freeman A. SAR calibration: an overview. *IEEE Trans. on GRS*, 1992, 30(6): 1107 – 1121.
- [2] Zou Kun, Liang Diannong. Radiometric calibration of low frequency UWB SAR images. EUSAR, Ulm, Germany, 2004: 917 – 920.
- [3] 邹鲲, 梁甸农, 低频 UWB SAR 图像的辐射校准. *系统工程与电子技术*, 2005, 27(1): 25 – 27.
- [4] Soumekh M. Reconnaissance with ultra wideband UHF synthetic aperture radar. *IEEE Sig. Process. Magazine*, 1995, 12(4): 21 – 40.
- [5] Geng N, Ressler M A, Carin L. Wide-band VHF scattering from a trihedral reflector situated above a lossy dispersive halfspace. *IEEE Trans. on GRS*, 1999, 37(5): 2609 – 2617.
- [6] Rao S.M, Wilton D R, Glisson A W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape. *IEEE Trans. on AP*, 1982, 30(5): 409 – 418.
- [7] Cockrell C R, Beck F B. Asymptotic Waveform Evaluation (AWE) technique for frequency domain electromagnetic analysis. NASA Technical Memorandum 110292. 1996.
- [8] 邹鲲, 梁甸农, 低频 UWB SAR 天线方向图的校准. *雷达科学与技术*, 2004, 12(3): 188 – 192.

邹 鲲: 男, 1976 年生, 博士生, 从事低频超宽带 SAR 系统分析等研究.

梁甸农: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 从事超宽带雷达系统理论及自适应信号处理、现代谱估计等研究工作.