

基于回波域的低频 UWBSAR 极化校准*

邹 鲲 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 :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。基于系统回波模型,同时考虑定标体的电磁散射特性,给出了适合该系统的极化校准方法。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 :TP957 文献标识码 :A

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

ZOU Kun, LIANG Dian-nong

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

Abstract :Multi-polarization, low frequency ultra-wideband 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 common SAR polarimetric calibration cannot be used. In this paper, with the system echo model, considered the electromagnetic scattering characteristics of the reference calibrator, the polarimetric calibration for the system is proposed. The computer simulation is used to validate the method.

Key words :low frequency UWBSAR, polarimetric calibration, electromagnetic scattering

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是一种二维微波成像系统, 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。

多极化低频 UWBSAR 是未来雷达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特性,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)获得方位向高分辨率。但这些特性导致基于常规高频窄带 SAR 的校准技术不再适用,因此,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[2~4]。本文主要讨论系统的极化校准,并假设系统已进行过辐射校准。

1 低频 UWBSAR 回波模型

低频 UWBSAR 的几何模型与常规 SAR 是相同的,如图 1 所示,而它们的主要区别主要来源于系统参数的不同。低频 UWBSAR 系统有更大的方位向波束张角,目标的多普勒历史(回波延迟相位)不能简单地近似为线性调频信号,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。所以低频 UWBSAR 系统的回波模型比常规 SAR 更加复杂。多极化 SAR 系统通常是多通道处理。某一种极化组合方式(例如发射

* 收稿日期 2004 - 11 - 05

基金项目 :十五 国家部委基金资助项目(41307020203)

作者简介 :邹鲲(1976—),男,博士生。

极化方式为水平(H)极化,接收极化方式为垂直(V)极化)下的回波模型,很容易应用到多通道处理模型中去。

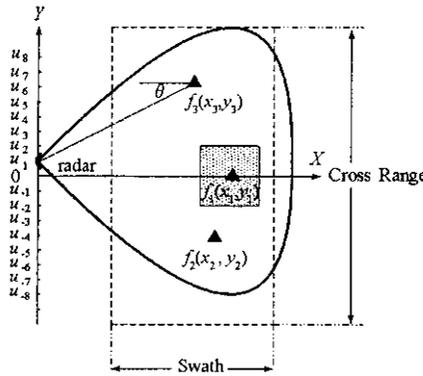


图 1 低频 UWBSAR 几何关系

Fig. 1 Geometry of low frequency UWBSAR

图 1 是 SAR 三维几何关系在方位向—斜距向构成的二维平面上的投影。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,接收的回波可以表示为^[5]:

$$s^{MN}(u, \omega) = P(\omega)E^{MN}(\omega) \sum_n a_n^{MN}(\theta_n, \omega) a_n^{MN}(\theta_n, \omega) \exp[-j2k\sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2}] \quad (1)$$

其中,上标 MN 表示发射为 M 极化方式、接收为 N 的极化方式;P(ω)表示发射信号的频谱;E(ω)表示通道 MN 的频率畸变,它与极化组合方式有关;an(θn, ω)和 an(θn, ω)分别表示天线和第 n 个目标的辐射方向图,其中目标 n 的坐标为(xn, yn),辐射方向图是频率和方位角 θ 的二元函数,方位角 θ 表示目标与雷达的相对位置,且

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_n - u}{x_n}\right) \quad (2)$$

从回波模型可以看出,影响系统某个通道性能的因素主要来自通道的非理想频率响应,天线方向图的频率和角度的响应。如果考虑利用来自定标体的回波进行校准处理,则定标体自身的频率和角度响应也需要认真考虑。通道频率响应函数 E^{MN}(ω)可以通过辐射校准的方法进行补偿^[2,3],其次,各种极化组合方式下的天线方向性图也可进行估计和补偿^[4]。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,通常存在四种极化组合方式,利用式(1)将四种方式用矩阵同时表示:

$$s(u, \omega) = P(\omega) \sum_n R_n(\omega) a_n(\theta_n, \omega) T_n(\omega) \exp[-j2k\sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2}] \quad (3)$$

其中矩阵的表示方式为:

$$M = \begin{bmatrix} M_{HH} & M_{HV} \\ M_{VH} & M_{VV} \end{bmatrix} \quad (4)$$

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, R(ω)表示接收极化通道失真矩阵, T(ω)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调项(Cross-talk)和极化不平衡量(Imbalance),具体定义参见文献[1]。极化通道失真矩阵是目标位置和频率的函数,但是如果仅对较小区域图像进行极化校准,则可以忽略极化通道失真矩阵随目标位置的变化。由式(3)可知,校准处理还应该包括对极化通道失真矩阵的补偿。将式(3)进行矢量化后得到:

$$s(u, \omega) = P(\omega)A(\omega) \left\{ \sum_n a_n(\theta_n, \omega) \exp[-j2k\sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2}] \right\} \quad (5)$$

其中 4×4 矩阵 A(ω) = R(ω) ⊗ T(ω), 符号 ⊗ 表示 Kronecker 积。可见,极化校准的关键是寻找矩阵 A(ω) 的逆。而直接从式(5)对 A(ω) 的逆进行估计显然是很困难的。

2 定标体散射建模

针对低频 UWBSAR 的校准处理,定标体的散射特性必须予以考虑^[2],这是与常规 SAR 校准的一个显著区别。讨论定标体的电磁散射特性的建模问题,从理论上获得目标的散射特性 $a_n(\theta, \omega)$,它是校准的前提。

$a_n(\theta, \omega)$ 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(MOM)是较好的选择^[6]。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:

$$E^s(\mathbf{R}) = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi\mathbf{R}} \exp(-jk\mathbf{R}) \iint_S \mathbf{J}(\mathbf{r}') \exp(j\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}') dS \quad (6)$$

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,则电流密度满足方程:

$$\mathbf{E}^s = -\mathbf{E}^i = -j\omega\mathbf{A} - \nabla\phi \quad (7)$$

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(7)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运算。将面电流密度离散化是数值计算的第一步,这里采用 RWG 基函数^[7],将目标表面用任意三角形剖分。离散化的电流密度代入方程就可以得到如下的矩阵方程:

$$\mathbf{Z}\mathbf{I} = \mathbf{V} \quad (8)$$

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,而广义电阻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[7]。MOM 的计算精度与剖分的细致程度成正比,剖分越细,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,由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 方法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 UWBSAR 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,因为方程(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(AWE)方法^[8],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 角反射器 $a_n(\theta, \omega)$ 的幅频特性和相频特性。其中虚线表示利用 Taylor 展开获得的估计值,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地估计 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。

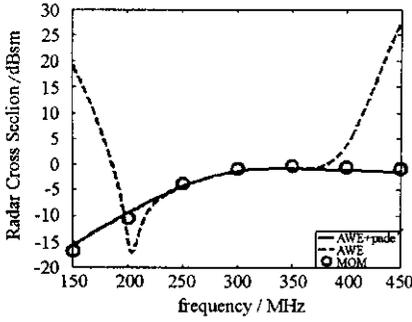


图2 三面角反射器 RCS 幅频特性

Fig.2 The amplitude-frequency response of RCS

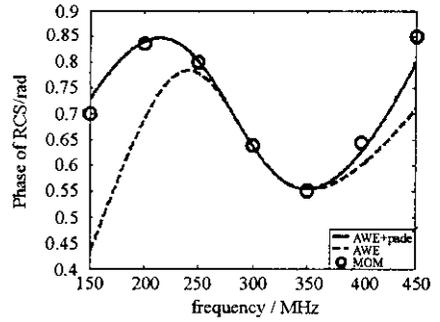


图3 三面角反射器 RCS 相频特性

Fig.3 The phase-frequency response of RCS

3 低频 UWBSAR 极化校准

从式(3)中直接提取极化通道失真矩阵是很困难的,因为接收的回波来自于整个天线照射面积内目标后向散射的总和。本文采用数字聚焦的方法^[5]获得感兴趣区域(region of interest, ROI)内的定标体的回波。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角坐标有关,可以通过滤波的方法,去除 ROI 沿方位角以外的目标回波。文献[5]只讨论了方位角的数字聚焦,其实沿距离向也有类似的方法,可将沿距离向 ROI 以外的目标回波去掉。

图4~6给出了数字聚焦方法在距离向和方位角的处理效果。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角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。

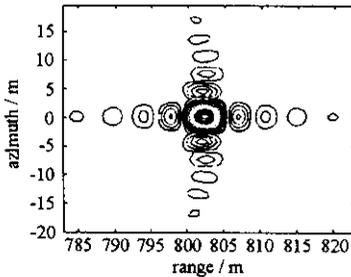


图4 单个点目标图像
Fig.4 A point target

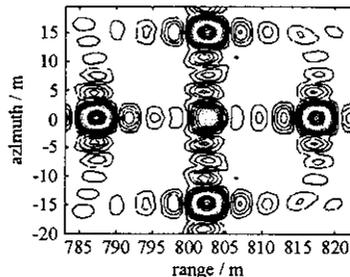


图5 受到干扰后的图像
Fig.5 A point target with interference

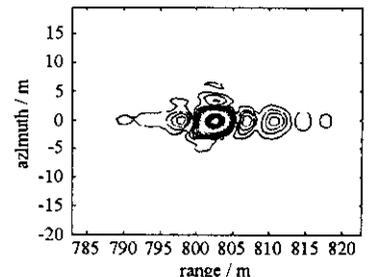


图6 数字聚焦处理后的点目标图像
Fig.6 The image after digital focusing

如果假设 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(5)就可以表示为:

$$s(u, \omega) = P(\omega)A(\omega)a_d(\theta_0, \omega) \exp[-j2k\sqrt{x_0^2 + (y_0 - u)^2}] \quad (9)$$

由于回波 $s(u, \omega)$ 是可以测量的,而目标散射特性 $a_d(\theta_0, \omega)$ 可以利用上节给出的方法计算出来,利用式(9)就可以实现对 (ω) 的逆的估计了。对式(5)回波的极化校准可以表示为:

$$s_c(u, \omega) = A^+(\omega)s(u, \omega) \quad (10)$$

其中 $A^+(\omega)$ 表示矩阵 (ω) 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,可以验证该模型的正确性。假设系统中心频率为 400MHz,频带范围 300~600MHz,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^[9]。

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,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。

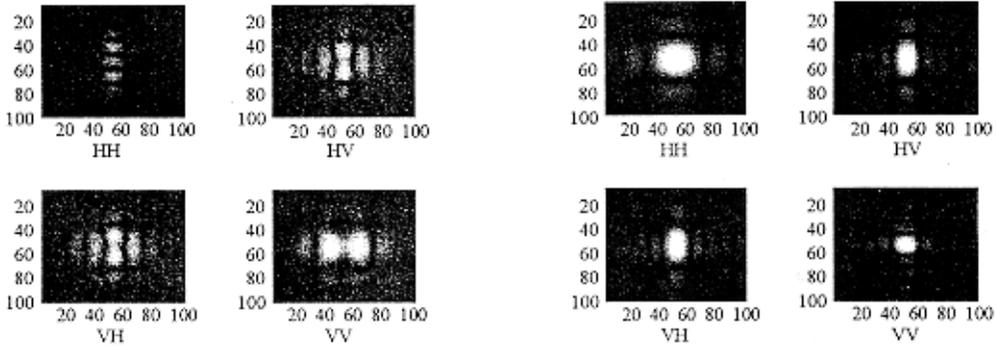


图 7 极化校准的前后对比

Fig.7 Comparison between before and after polarimetric calibration

该方法的校准效果从仿真结果来看,较为理想,而在实际过程中,还与 ROI 的尺寸有关,通常距离 ROI 中心距离越远,通道失真矩阵就不能认为与目标坐标无关,天线系统失真补偿效果就越差。因此该方法通常适合针对小区域的精确补偿,而要实现对大范围的天线失真补偿,还需在变换域内进行。

4 结论

多极化低频 UWBSAR 系统是一种先进的二维微波成像系统,针对该系统的极化校准目前研究较少,而常规的极化校准技术不能适用。根据该系统的回波模型,考虑到了定标体的超宽带宽角度散射特性,给出了极化校准公式。计算机仿真验证了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] Freeman A. SAR Calibration: An Overview[J]. IEEE Transactions on GRS, 1992, 30(6): 1107-1121.
- [2] Zou K, Liang D N. Radiometric Calibration of Low Frequency UWB SAR Images[C]. EUSAR2004, 917-920.
- [3] 邹鲲,梁甸农. 低频 UWBR 辐射校准[J]. 国防科技大学学报, 已录用.
- [4] 邹鲲,梁甸农. 低频 UWB SAR 天线方向图校准算法[J]. 信号处理, 已录用.
- [5] Soumekh M. Reconnaissance with Ultra Wideband UHF Synthetic Aperture Radar[J]. IEEE Sig. Process. Magazine, 1995, 13(4): 21-40.
- [6] Geng N, Ressler M A, Lawrence C. Wide-band VHF Scattering from a Trihedral Reflector Situated above a Lossy Dispersive Halfspace[J]. IEEE Trans. GRS, 1999, 37(5): 2609-2617.
- [7] Rao S M, Wilton D R, Glisson A W. Electromagnetic Scattering by Surfaces of Arbitrary Shape[J]. IEEE Trans. AP, 1982, AP-30: 409-418.
- [8] Cockrell C R, Beck F B. Asymptotic Waveform Evaluation (AWE) Technique for Frequency Domain Electromagnetic Analysis[R]. NASA Technical Memorandum 110292, 1996.
- [9] 邹鲲,梁甸农. 低频 UWB SAR 天线方向图的校准[J]. 雷达科学与技术, 2003, 1(3): 188-192.

