

低频 UWB SAR 图像辐射校准

邹 鲲, 梁向农

(国防科技大学电子科学与工程学 湖南长沙 410073)

摘要: 低频, 超宽带和大处理角是低频超宽带合成孔径雷达(ultra wide band synthetic aperture radar, UWBSAR)系统的三大特点, 针对该系统特点, 给出目标散射特性的计算方法, 并建立了散射特性与 SAR 图像的映射关系. 最后提出了低频 UWBSAR 的辐射校准方案, 并在计算机上得到了较为理想的仿真结果.

关键词: 低频超宽带合成孔径雷达; 辐射校准; 散射特性

中图分类号: TP957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)04-0721-04

Radiometric Calibration for Low Frequency UWB SAR images

ZOU Kun, LIANG Diarong

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

Abstract: The low frequency ultra wide band synthetic aperture radar (UWBSAR) system has three peculiarities: low frequency, ultra wideband and large processing angle. Based on these peculiarities, the scattering model of the targets is calculated and mapped to the SAR images. The calibration method is proposed in the end of the paper, and computer simulation is used to validate this method.

Key words: low frequency UWB SAR; radiometric calibration; scattering model

1 引言

低频, 超宽带和大处理角构成 VHF/UHF 超宽带合成孔径雷达(ultra wide band synthetic aperture radar, UWBSAR)区别于常规 SAR 的三个主要特点^[1]. 由这三个特点衍生出的高分辨率特性和叶簇穿透(foilage penetration, FOPEN)功能则是 UWBSAR 的显著优点. 在系统信息处理方面, 这三个特点使得常规 SAR 的许多处理方法不再适用.

系统的低频特性使得人造目标尺寸与系统工作波长相比拟, 目标散射特性不能用高频散射模型进行计算^[2]. 而系统的超宽带和大处理角特性使得目标的散射特性随频率和方位角的变化不能忽略. 因此 UWBSAR 的辐射校准方法不同于常规高频窄带窄波束 SAR.

针对中心频率 400MHz, 带宽为 300MHz 的 SAR 系统, 在第二部分讨论了目标散射特性, 对角反射器在频率-方位角域内的散射特性进行了分析和计算. 在第三部分给出了 UWBSAR 目标模型, 并指出目标图像的二维频率域和目标散射特性存在一个映射关系. 利用这个映射关系在第四部分给出了系统辐射校准的方法, 并进行了计算机仿真试验.

2 UWBSAR 目标散射特性的计算

目标的散射特性通常是由目标尺寸和系统工作波长的比

值决定的. 常规 SAR 系统带宽较小, 天线方位向波束宽度较窄, 且辐射校准所使用的参考目标尺寸通常远大于系统工作波长, 参考目标的雷达散射截面(radar cross section, RCS)可以假定是独立于入射波频率和角度的常量, 其散射特性属于高频散射模型. 对于低频 UWBSAR 系统, 参考目标的 RCS 随频率和角度的变化关系都不能忽略, 且参考目标的尺寸不可能远大于系统工作波长, 其散射特性属于低频谐振散射.

因此对于低频 UWBSAR 参考目标的电磁散射特性的计算主要考虑两个方面, 其一是选择适合低频谐振散射模型的电磁计算方法, 其二是获得超宽带和大波束角范围内的散射特性方法.

对于电磁散射和辐射问题, 其关键在于求解给定辐射源条件下, 散射体表面的感应电流分布. 矩量法(method of moment, MOM)给出了数值求解感应电流分布的方法, 结合散射体表面的电磁场边界条件, 将泛函方程转换为矩阵方程, 利用线性代数理论进行求解.

将面电流密度离散化是数值计算的第一步. 这里采用 Rao 等人给出的基函数^[4], 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:

$$ZI = V \quad (1)$$

其中 Z 为广义阻抗, I 和 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方程(1)两边右乘 Z^{-1} 得到. 具体求解过程参见文献[4]. MOM 的计算精度与剖分的细致程度成正比. 而剖分得越细, 产生的广义阻抗矩阵就越大, 导致求解其逆矩阵越困难.

要获得超宽带内的目标辐射方向图, 仅仅利用 MOM 方法是很困难的, 这是因为 MOM 每次仅能计算一个频点的目标散射特性. 为了提高计算效率, 本文采用渐进波形估计技术^[5], 其原理是计算中心频率广义阻抗的各阶导数, 在中心频率附近用级数展开得到宽带散射特性, 阶数的确定与计算所要求的精度有关. 然而利用 Taylor 级数展开得到的估计值收敛区间较小, 本文计算中采用了 pade 近似, 仅利用少数几阶导数就可以获得超宽带上的散射特性.

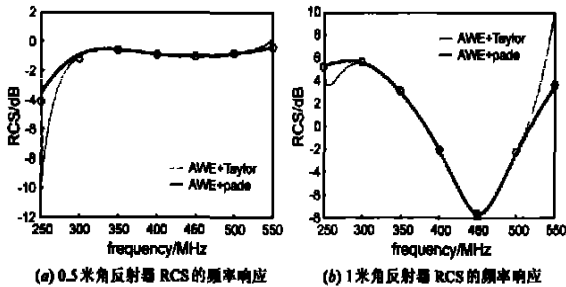


图 1 角反射器的频率响应

图 1 给出了利用 AWE 技术估计角反射器 RCS 超宽带特性的结果. 利用 AWE 计算了中心频率为 400MHz, 带宽为 300MHz 范围内 0.5 米和 1 米角反射器 RCS 频率变化曲线. 图中实线表示利用 pade 近似得到的估计结果, 虚线表示利用常规的 Taylor 级数展开的方法估计的结果, 圆圈表示利用 MOM 得到若干频点上的 RCS. 可以看出, 要计算超宽带散射特性,

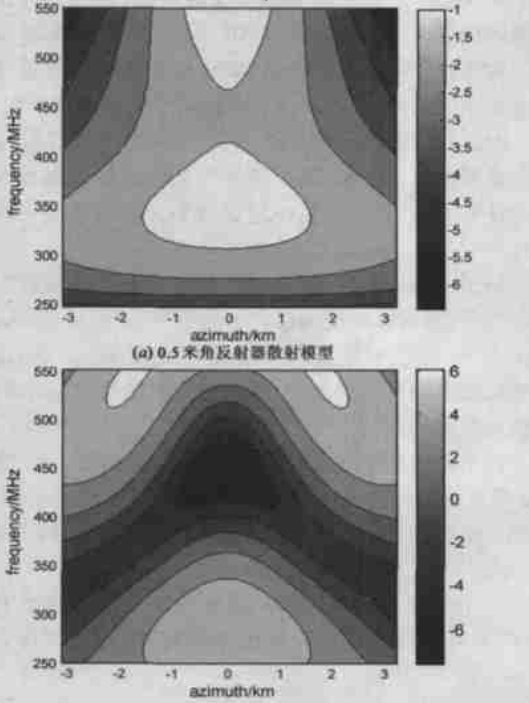


图 2 角反射器的散射模型

采用 pade 近似是必要的, 图 1 给出的结论是 Taylor 级数展开方法只能在中心频率附近 $\pm 100\text{MHz}$ 范围内准确估计, 而利用 pade 近似后, 可以在 300MHz 带宽内得到与 MOM 计算吻合的估计值.

目标辐射方向图沿 θ 角变化的计算与常规文献中的散射特性计算方式是不一样的. 假定以目标为中心的球坐标系中, 由 SAR 的几何关系可知, θ 角是球坐标系的俯仰角和方位角的二元函数, 而计算目标散射特性在球坐标系中所有方向上的变化是没有必要的. 本文利用 SAR 几何关系, 假定目标位于合成孔径中心处, 得到目标散射特性随雷达方位角坐标的关系.

图 2 给出了角反射器 RCS 随频率和雷达位置变换关系, 这里假定目标位于合成孔径中心, 系统天线波束张角方位角为 90° . 从图 2 可以看出, 参考目标尺寸越大, 其散射特性随角度变化越剧烈, 从这个意义上来说, 选择尺寸较小的参考目标有利于辐射校准, 但小尺寸的参考目标 RCS 较小, 会带来较大的辐射校准误差. 因此针对低频 UWBSAR 的辐射校准, 定标体尺寸应该折中考虑.

3 UWBSAR 处理模型

SAR 处理模型总是和成像算法相关的, 而所有的 SAR 成像算法都是利用信号之间的相参特性进行相干叠加, 实现图像的聚焦. 本文给出的处理模型就是基于这一原理的. 它将接收到的信号在距离频率域和方位空域内进行相干叠加, 得到聚焦后的图像.

假设成像区域存在一个点目标, 位于 (x_0, y_0) 处, 如图 3 所示关系. 合成孔径半长度为 L , 则点目标图像中坐标为 (x_m, y_n) 处的值可以表示为^[6]:

$$pic(x_m, y_n) = \int_{f_l}^{f_h} \int_{-L}^L \exp(-j \frac{4\pi}{C} f (\sqrt{x_m^2 + (y_n - u)^2} - \sqrt{x_0^2 + (y_0 - u)^2})) du df \quad (2)$$

其中 C 表示电磁波传播速度, f 表示距离频率, u 表示雷达方位角坐标. 双重积分中, 频率 f 的积分限 (f_h, f_l) 表示系统工作的频率范围, 沿频率 f 的积分相当于距离方向的聚焦, 方位角 u 的积分限 $(-L, L)$ 表示合成孔径范围, 沿方位角 u 的积分相当于方位角的聚焦, 其中方位角匹配滤波器就是被积函数中的第二个指数项. 虽然式(2)并不代表某种成像算法, 但对于分析目标特性是非常有用的.

考虑位于 (x_0, y_0) 处目标的周围区域, 式(2)在 (x_0, y_0) 附近用 Taylor 级数展开, 并忽略二阶以上的系数得到:

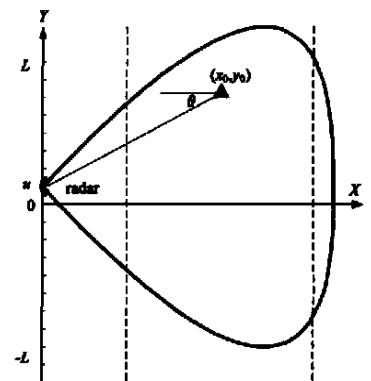


图 3 SAR 成像几何关系图

$$pic(x_m, y_n) = \frac{C}{2\pi} \int_{k_L}^{k_H} \int_{-L}^L \exp(-j2k(\frac{\partial}{\partial x}\phi(x_0, y_0)[x_m - x_0] + \frac{\partial}{\partial y}\phi(x_0, y_0)[y_n - y_0])) dk du \quad (3)$$

其中 $\phi(x_0, y_0) = \sqrt{x_0^2 + (y_0 - u)^2}$. 式(3)中将积分变量 f 变换为波数 k , 它们的关系是 $k = \frac{2\pi f}{C}$. 令 $\theta = \arctg\left(\frac{y_0 - u}{x_0}\right)$, 它表示雷达与目标的视角. 引入本文第二部分得到的目标 RCS 特性 $\sigma(f, u)$, 它是距离频率 f 和方位角坐标 u 的函数, 利用上述关系, 可以得到由距离波数 k 和视角 θ 表示的 RCS 散射特性 $\sigma(k, \theta)$. 则式(3)可以变换为:

$$pic(\Delta x, \Delta y) = \int_{k_L}^{k_H} \int_{\arctg((y_0-L)/x_0)}^{\arctg((y_0+L)/x_0)} \sigma(k, \theta) \exp(-j2k(\cos\theta_0\Delta x + \sin\theta_0\Delta y)) dk d\theta \quad (4)$$

其中 $\Delta x = x_m - x_0$, $\Delta y = y_n - y_0$. 式(4)的积分区域为图 4 所示形区间. 进行如下积分变量替换:

$$\begin{cases} kx = 2k \cos\theta \\ ky = 2k \sin\theta \end{cases} \quad (5)$$

由二维 Fourier 变换公式, 式(4)可以表示为:

$$PIC(kx, ky) = D(kx, ky) \sigma(kx, ky) \quad (6)$$

对于 0.5 米和 1 米角反射器, 式(6)的结果如图 4 所示, 其中波束张角假定为 60° . 函数 D 表示在图 4 中块形区域取值为 1, 其他位置取值为 0. 由上面的分析可知, UWBSAR 目标特性 $\sigma(k, \theta)$ 在图像的二维频率域上是映射关系式(5)得到的. 而函数 D 说明图像仅包含有限带宽和有限方位角的目标特性. 由式(6)可知理想点目标的图像是函数 D 的二维逆 Fourier 变换.

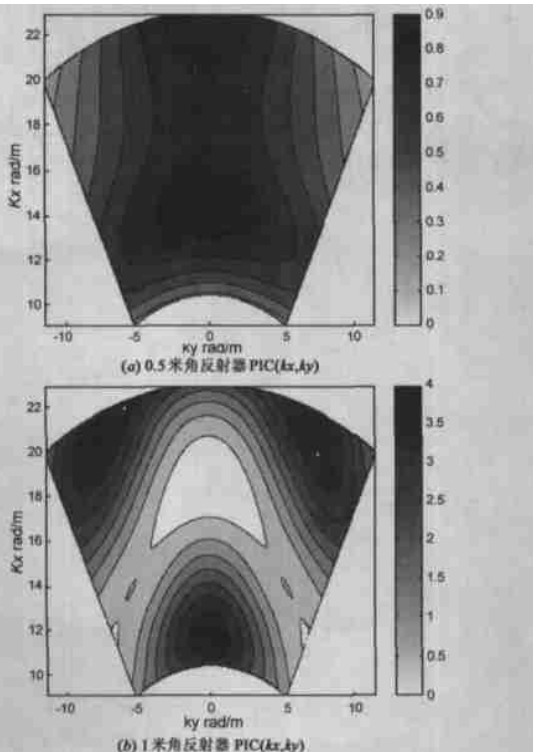


图 4 参考目标二维波数域散射特性

4 UWBSAR 辐射校准

由系统的超宽带特性和大处理角特性可见, 低频 UWB SAR 辐射校准的核心就是对系统内部设备的频率响应 $E(k)$ 和天线的频率-方位角响应 $A(k, \theta)$ 的校正, 这两个响应函数都是未知的. 可以将前面讨论的结论应用到辐射校准中. 假设系统首先对角反射器成像, 由式(4)~(6)可以得到角反射器的 SAR 图像的二维频率域表示:

$$PIC_c(kx, ky) = D(kx, ky) E(kx, ky) A(kx, ky) \cdot \sigma_c(kx, ky) e^{jkxX_0 + jkyY_0} \quad (7)$$

其中位于坐标 (X_0, Y_0) 处的参考目标散射特性为 $\sigma_c(kx, ky)$, 它可以利用第 2 节的方法得到. 在实际条件下, 还必须考虑杂波的影响. 通常要求参考目标周围杂波较小, 在处理过程中采用数字聚焦^[1]的方法, 抑制目标周围杂波. 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, 去除沿方位向的杂波. 文献[1]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, 从而将沿距离向杂波去掉. 待校准的图像可以表示为:

$$PIC(kx, ky) = D(kx, ky) E(kx, ky) A(kx, ky) \cdot \sum_n \sigma_n(kx, ky) e^{jkxX_n + jkyY_n} \quad (8)$$

式(8)表示待校准图像中存在若干个目标, 位于坐标 (X_n, Y_n) 处的目标散射特性为 $\sigma_n(kx, ky)$. 利用式(7)就可以实现对图像的校准:

$$PIC_{cal}(kx, ky) = \frac{\sigma_c(kx, ky) e^{jkxX_0 + jkyY_0}}{PIC_c(kx, ky)} PIC(kx, ky) \quad (9)$$

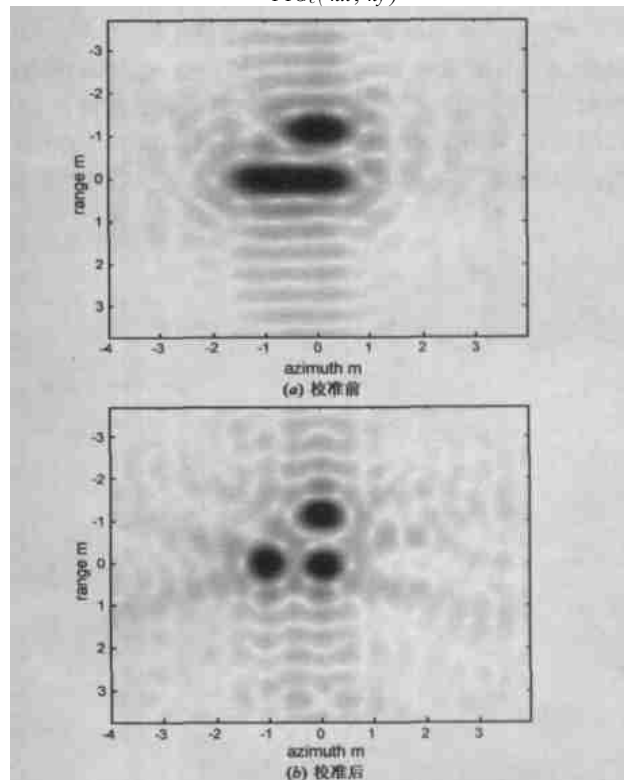


图 5 本文方法辐射校准效果比较

计算机仿真验证了以上方法. 仿真过程中, 系统中心频率为 400MHz, 带宽为 300MHz, 采用机载 SAR 系统参数, 载机高度为 4000 米, 下视角为 45° . 在回波仿真中考虑了目标散射特性和天线方向图. 其中天线方向图数据来自国防科技大学电子工程学院超宽带雷达天线测量结果, 天线方向图波束角为 60° . 假定场景中存在 3 个点目标, 彼此沿方位向和距离向间距为 1 米.

对仿真回波采用波数域成像算法, 得到图 5(a) 所示. 可见由于天线方向图的非理想特性导致了方位向上的目标模糊. 利用本文的方法, 对图像进行校准, 得到图 5(b) 所示. 三个目标可以区分. 图 6 给出了校准前后, 目标方位向和距离向的剖面.

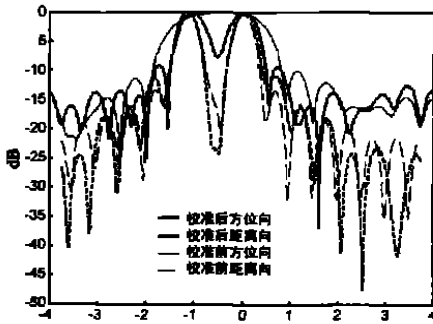


图 6 校准前后距离向和方位向剖面

从图 6 可以看出, 方位向上目标分辨特性经过校准后得到明显改善, 而距离向改善不明显, 这是因为天线方向图在频带内的变化幅度较小, 而在波束张角方位内变化较大的缘故.

5 结论

辐射校准本身就是一项复杂的系统工程, 要考虑的因素很多, 本文针对低频 UWBSAR 系统的特性, 在 SAR 图像辐射校准过程中, 考虑了参考目标自身的电磁散射特性和 SAR 的几何关系, 采用 MOM 和渐进波形估计技术相结合的方法, 得到适当的目标电磁散射模型. 为了实现二维波数域图像校准,

还必须将该散射模型进行映射和插值. 从仿真试验来看, 图像质量得到较大改善, 尤其是方位向分辨率的提高, 从而验证了该方法的有效性.

参考文献:

- [1] Soumekh M, Reconnaissance with ultra wideband UHF synthetic aperture radar[J]. IEEE sig. Process. Magazine, 1995, 12(4): 21- 40.
- [2] Geng N, Ressler M A, Carin L. Wide band VHF scattering from a trihedral reflector situated above a lossy dispersive halfspace[J]. IEEE Trans, 1999, GRS 37(5): 2609- 2617.
- [3] 克拉特, 等著. 阮颖铮译, 雷达散射截面估计, 测量和减缩[M]. 北京: 电子工业出版社, 1988. 47- 110.
- [4] Rao S M, Wilton D R, Glisson A W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape[J]. IEEE trans, 1982, AP- 30(3): 409- 418.
- [5] Cockrell C R, Beck F B. Asymptotic waveform evaluation (AWE) technique for frequency domain electromagnetic analysis[R]. NASA Technical Memorandum 110292. 1996.
- [6] Rau R, McClellan J H. Analytic models and postprocessing techniques for UWB SAR[J]. IEEE trans, 2000, AES- 36(4): 1058- 1074.

作者简介:



邹 鲲 男, 1976 年出生于湖北黄冈市, 1998 年和 2001 年在空军工程大学分别获得学士和硕士学位, 现在国防科技大学电子科学与工程学院攻读博士学位, 主要从事低频超宽带 SAR 系统分析等研究. E-mail: zoukun2003@yahoo.com.cn.

梁甸农 男, 1936 年出生于湖南涟源县, 现为国防科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师, 中国电子学会会士, 主要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.