

基于三维 SAR 成像的 RCS 近远场变换方法研究

张晓玲 陈明领* 廖可非 师君 韦顺军
(电子科技大学电子工程学院 成都 611731)

摘要: 微波 3 维成像能够准确地从背景噪声中分离出目标的散射信息, 适用于外场目标电磁(EM)散射特性的分析和研究, 因而从 3 维合成孔径雷达(SAR)成像的角度研究目标电磁的散射特性是目前的一个新兴的热门课题。该文以此为背景, 首先从 Stratton-Chu 积分方程出发详细推导 3 维 SAR 的近场波数域成像过程, 解释 3 维 SAR 成像的物理意义; 然后阐述基于 3 维 SAR 成像的雷达散射截面(RCS)近远场变换原理, 介绍 3 维 SAR 图像的散射中心提取方法, 给出基于 3 维 SAR 成像的 RCS 近远场变换算法; 最后通过 FEKO 软件进行了仿真实验, 得到了 5 个点目标的 RCS 近远场变换的方位特性曲线和频率特性曲线, 并通过与理论情况的对比, 验证该算法在 RCS 近远场变换技术中的有效性。

关键词: 3 维合成孔径雷达成像; Stratton-Chu 积分方程; 近远场变换

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)02-0297-06

DOI: 10.11999/JEIT140535

Research on Methods of Targets' RCS Near-field-to-far-field Transformation Based on 3-D SAR Imaging

Zhang Xiao-ling Chen Ming-ling Liao Ke-fei Shi Jun Wei Shun-jun

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Microwave 3-D imaging technique can accurately separate and extract the attractive targets from the background noise. So it can be utilized to analyze and study the ElectroMagnetic (EM) scattering characteristics of the outfield targets. Thus researching the EM scattering characteristics of targets from the perspective of 3-D SAR imaging is becoming an emerging hot field. Based on the background above, firstly, the near field 3-D imaging process in wave-number domain is deduced from the Stratton-Chu integral equation and the physical meaning of 3-D SAR imaging is explained. Then, the principle of targets' Radar Cross Section (RCS) Near-Field-to-Far-Field Transformation (NFFFT) based on 3-D SAR imaging is elaborated and the method of scattering center extraction from 3-D SAR image is introduced and the algorithm of targets' RCS NFFFT based on 3-D SAR imaging technique is presented. Finally, though some experiments using the FEKO software, five scattering points' observing angle characteristic curve and frequency characteristic curve are gotten. Through the comparative experiments with the ideal situation, the effectiveness of the RCS NFFFT algorithm is validated.

Key words: 3-D SAR imaging; Stratton-Chu integral equation; Near-Field-to-Far-Field Transformation (NFFFT)

1 引言

雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)^[1,2]是表征雷达目标散射电磁波能力强弱的物理量。近年来, 随着科技的进步, RCS 测量技术在隐身与反隐身、探测与反探测、精密制导等关键技术的研究中得到了不断发展, 在这期间如何提高测量精度和改善测量环境一直都是 RCS 测量研究中的热点问题。根据 RCS 的定义, 为获得目标精确的 RCS 值, 要求天线的测试距离非常远(满足远场条件), 对于

电大尺寸的目标, 显然在现有条件下, 无论是在微波暗室还是在外场测试, 严格的远场测量都是难以实现的。而近场测试是当前国内外解决此问题的一种重要方法^[3,4], 该法具有测量信息量大、测试距离短、测量精度高、实验条件易于实现、能够全方位多角度观测目标等特点。

3 维合成孔径雷达 SAR 成像技术^[5,6]就是利用近场测试的这些特点, 在目标散射近场测试回波, 通过天线运动合成虚拟面阵获得面阵平面内的 2 维高分辨率, 通过对发射的宽带信号的脉冲压缩处理获得距离向的高分辨, 从而实现目标或观测区域的 3 维成像。由于 3 维 SAR 成像技术具有 3 维分辨能力, 故它能够克服传统 2 维 SAR 的阴影效应, 准确

2014-04-24 收到, 2014-09-15 改回

高等学校博士学科点专项科研基金(21850990)资助课题

*通信作者: 陈明领 chenhl353850097@sina.com

地从环境噪声中分离提取出目标的 3 维空间位置、散射幅度和散射相位等有用信息, 对这些信息经过近场变换算法就可以得到目标的远场 RCS。因而 3 维 SAR 成像技术在 RCS 的外场测量上有重要的应用价值, 可有效促进隐身飞行器和隐身舰船的设计制造, 便于隐身武器的外场维护。

以此为背景, 本文研究基于 3 维 SAR 成像的近远场变换方法。首先, 从 Stratton-Chu 积分方程出发, 利用平面波谱展开技术, 研究 3 维 SAR 的近场波数域成像算法, 从电磁学的角度解释 3 维 SAR 成像的意义; 然后, 简要介绍散射中心提取方法和散射点 RCS 的定标技术, 并给出基于 3 维 SAR 成像的 RCS 近远场变换算法; 最后, 建立五点目标模型, 利用 FEKO 软件计算目标近场回波, 再分别利用本文的 RCS 近远场变换算法和 FEKO 软件计算出 RCS 的反演曲线和理论曲线, 通过二者对比, 验证本文研究的基于 3 维 SAR 成像算法的 RCS 近远场变换算法的有效性。

2 3 维波数域成像的电磁学解释

本文所述方法基于单发单收的 3 维阵列 SAR 成像系统, 如图 1 所示, 其基本工作原理可表示为: 单发单收天线在 XOY 平面的一个矩形范围内发射/接收数据。发射机发射宽带信号获得距离(Z)向高分辨率, 发射机和接收机在 2 维平面内运动形成大的虚拟面阵获得 2 维平面(X, Y)方向的高分辨率。根据电磁学理论, 当发射信号为平面波时, 接收机接收的电场回波信号可由 Stratton-Chu 积分方程表示为^[7-9]

$$\mathbf{E}^s = \int_{V'} [j\omega\mu\mathbf{J}\psi - \mathbf{M} \times \nabla\psi + \frac{\rho}{\varepsilon}\nabla\psi] dp' \quad (1)$$

其中 ω 为角频率, μ 为目标的磁导率, ε 为目标的电导率, p' 为目标面元的坐标值, \mathbf{J} 为表面电流密度, \mathbf{M} 为表面磁流密度, ρ 自由电荷密度。 ∇ 是梯度算子, ψ 为格林函数^[7]。

$$\psi = \frac{\exp(-jkR)}{4\pi R} \quad (2)$$

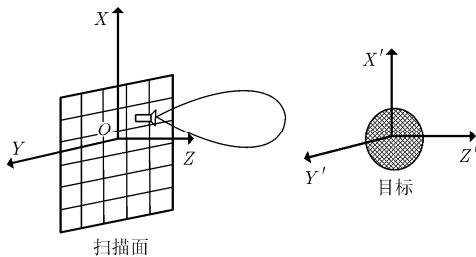


图 1 3 维成像系统模型

对格林函数式(2)求梯度, 则可以得到

$$\nabla\psi = \frac{(-1 - jk|p - p'|)\hat{\mathbf{p}}}{|p - p'|} \psi \quad (3)$$

其中 $R = |p - p'|$ 为阵元到目标面元的距离, p 为接收阵元的坐标值, 实际中, 目标一般为电中性的, 即 $\rho \approx 0$, 若 $k|p - p'| \gg 1$, $\nabla\psi \approx jk\hat{\mathbf{p}}\psi$, $\hat{\mathbf{p}}$ 为面元和接收阵元的方向向量, k 为波数, $k = \omega/c$, c 为光速。式(1)可简化为

$$\mathbf{E}^s \approx \int_{V'} [j\omega\mu\mathbf{J}\psi + jk(\mathbf{M} \times \hat{\mathbf{p}})\psi] dp' \quad (4)$$

若极化方向为 $\hat{\mathbf{a}}$, 且 $|\hat{\mathbf{a}}| = 1$, 则式(4)转化为

$$E(x, y, k) = \hat{\mathbf{a}} \cdot \mathbf{E}^s \approx \int_{V'} \hat{\mathbf{a}} \cdot [j\omega\mu\mathbf{J}\psi + jk(\mathbf{M} \times \hat{\mathbf{p}})\psi] dp' \quad (5)$$

令 $f(x', y', k) = \hat{\mathbf{a}} \cdot [j\omega\mu\mathbf{J} + jk(\mathbf{M} \times \hat{\mathbf{p}})] / (4\pi R)$, 将式(5)展开成二重积分形式为

$$E(x, y, k) = \iint f(x', y', k) e^{-jkR} dx' dy' \quad (6)$$

其中 $R = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + z_0^2}$, z_0 表示 XYZ 坐标系零点到 X'Y'Z' 坐标系零点的距离, 将式(6)中的球面波相位利用平面波形式展开有^[2]

$$e^{-jk\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+z_0^2}} = \iint e^{jkx(x-x') + jky(y-y') + jkz z_0} dk_x dk_y \quad (7)$$

其中 k_x, k_y, k_z 为 X, Y, Z 轴方向的空域谱, k_z 满足色散公式 $k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}$, 而 k_x, k_y 可由采样定理确定^[2]

$$\left. \begin{aligned} k_x &\in \left[-\frac{\pi}{dx}, \frac{\pi}{dx} \right] \\ k_y &\in \left[-\frac{\pi}{dy}, \frac{\pi}{dy} \right] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中 dx, dy 分别为 X, Y 轴方向的阵元间隔, 则将式(7)代入式(5)有

$$E(x, y, k) = \iint \left[\iint f(x', y', k) e^{-jkx x' - jky y'} dx' dy' \right] \cdot e^{jkx x + jky y + jkz z_0} dk_x dk_y \quad (9)$$

令 $F(k_x, k_y, k) = \iint f(x', y', k) e^{-jkx x' - jky y'} dx' dy'$,

这就是近场散射的 2 维波数谱, 将其代入式(9)则

$$E(x, y, k) = \iint F(k_x, k_y, k) e^{jkz z_0} e^{jkx x + jky y} dk_x dk_y = \text{FT}_{2D}^{-1} [F(k_x, k_y, k) e^{jkz z_0}] \quad (10)$$

$$F(k_x, k_y, k) = \text{FT}_{2D} [E(x, y, k)] e^{-jkz z_0} \quad (11)$$

对于高精度的 3 维 SAR 成像而言, 由于 k_x, k_y, k 三者不垂直, 故需要使用 Stolt 插值^[10,11], 将坐标变换到相互垂直的 k_x, k_y, k_z 维。

$$F(kx, ky, k)kz = \sqrt{k^2 - kx^2 - ky^2} F(kx, ky, kz) \quad (12)$$

依据平面波谱展开理论当 $kx^2 + ky^2 > k^2$, 即 kz 为虚数时, 波谱 $F(kx, ky, k)$ 是平面波谱展开中产生的非均匀平面波分量, 这部分波谱分量不能进行能量传播, 并随着传播距离的增加迅速衰减。这些分量对于目标的像没有贡献, 不参与叠加求总场的过程, 故在插值过程中可以舍去这部分数据以降低计算量。

sinc 插值公式:

$$F(kx, ky, kzi) = F(kx, ky, ki + \Delta k_{kzi}) \\ = \sum_{n=-P/2}^{P/2-1} F(kx, ky, ki + ndk) \text{sinc}[\pi(-n + \Delta k_{kzi})] \quad (13)$$

其中 $ki + \Delta k_{kzi} = \sqrt{kx^2 + ky^2 + kzi^2}$ 。

$$f(x', y', z') = \text{FT}_{3D}^{-1} \{F(kx, ky, kz)\} \quad (14)$$

式(14)就是目标在坐标 (x', y', z') 处的近场散射率或近场电磁流分布, 结合 $f(x', y', k)$ 表达式可知, 式(14)传递了两个重要信息, 即通过对 3 维 SAR 图像的重建, 第一可以获得每个散射点的 3 维位置坐标, 第二可以获得该坐标处的散射率或电磁流分布。

3 基于 SAR 成像的 RCS 近远场变换

3.1 基于 SAR 成像的 RCS 近远场变换原理

利用 3 维成像算法得到目标的 3 维 SAR 图像后, 需要对散射中心进行提取, 典型的散射中心提取算法有 CLEAN 算法^[12-14]和局部最大值提取算法, CLEAN 算法是通过迭代去卷积获得散射中心; 局部最大值提取算法是提取图像中的局部极值点作为散射点, 并将极值作为散射率或电磁流分布, 将极值位置作为散射点的位置, 散射中心提取完成之后认为该散射点是以散射率为极值的各向同性的理想散射点。两种算法中 CLEAN 算法相对精确, 但是运算量相对较大, 而局部最大值提取算法实现简单, 对一些精度要求不高的情况有很大的利用价值。

散射中心提取完成后, 下一步则是去求各散射点的 RCS。由式(14)可知, 在近场对目标成像后, 所得到的极值像函数 $f(x', y', z')$ 是近场的散射率或近场电磁流分布, 其为距离 R 的函数, 为求得每个散射点远场处的 RCS, 则需要对 $f(x', y', z')$ 进行距离补偿。为克服环境噪声及成像算法等带来的部分误差, 本文采用定标法求散射点的 RCS, 公式为

$$\sigma_i = \left| \frac{f(x'_i, y'_i, z'_i)}{f(x'_0, y'_0, z'_0)} \right|^2 \left(\frac{R_i}{R_0} \right)^2 \sigma_0 \quad (15)$$

式中 σ_i 为第 i 个散射点的 RCS, $f(x'_i, y'_i, z'_i)$, $f(x'_0, y'_0, z'_0)$ 分别为第 i 个散射点的散射率或电磁流分布、定标体的散射率或电磁流分布, R_0, R_i 分别是定标体、

第 i 个散射点到阵列天线相位中心的距离, σ_0 为定标体的 RCS。

对于定标体的选择通常是那些结构简单, 散射特性已知的物体, 如金属球、金属方板等, 金属球体其频率特性为 Mie 函数^[2], 金属方板的方位特性在一定角度下接近于 sinc 函数的形式, 对于垂直入射时, 金属球、方板在高频情况下的理论计算公式分别为 πa^2 , $4\pi A^2 / \lambda^2$, 其中 a 为球体的半径, A 为方板的面积, λ 为入射波的波长^[15]。

当求得散射点的 RCS 后, 代入式(16)即可求得所需的方位和所需频率的 RCS 值。

$$\text{RCS}(\theta, k) = \left| \sum_i \sqrt{\sigma_i} \exp[-jk(\hat{r}_\theta \cdot \mathbf{r}_i)] \right|^2 \quad (16)$$

式(16)为基于 3 维 SAR 成像的 RCS 近远场变换公式, $\sqrt{\sigma_i}$ 为第 i 个散射中心点的 RCS 的平方根, k 为波数, \hat{r}_θ 为目标 3 维像坐标系下从原点到观测点的单位向量, 所以 $\mathbf{K} = k\hat{r}_\theta$ 就为原点到观测点的波数矢量, θ 为 \hat{r}_θ 与 Z 轴正方向的夹角, \mathbf{r}_i 为第 i 个散射中心点的坐标矢量, $\hat{r}_\theta \cdot \mathbf{r}_i$ 为内积。各量坐标关系如图 2 所示。

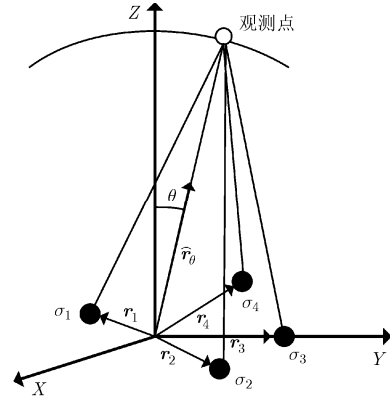


图2 基于 3 维 SAR 图像的 RCS 近远场变换示意图

3.2 RCS 方位特性近远场变换算法

根据上述原理知识, 为了研究目标 RCS 随方位角和信号频率变化的规律, 本节将总结出 RCS 近远场变换算法, 该算法基本思想是通过近场测试回波数据, 通过 3 维成像获得目标散射点的 3 维空间信息和散射强度信息, 然后通过定标法再分别得到每个散射中心点的 RCS 值, 最后通过式(16)计算得到所需观测角度范围和所需频率范围的 RCS, 具体的步骤为:

步骤 1 确定所要获得的 RCS 观测角和频率范围, 设置定标体, 通过定标体的理论公式求得定标体的 RCS 值;

步骤 2 分别测得定标体和待测目标的散射回波数据;

步骤 3 对定标体回波进行 3 维成像, 并从中提取定标体的散射强度和 3 维坐标;

步骤 4 对目标回波数据进行 3 维成像, 并从其 3 维 SAR 图像中提取以下两种信息:

(1) 目标各散射中心点的位置信息, 并以目标中心为坐标原点建立 3 维直角坐标系, 并获得该坐标系下各散射中心点的坐标;

(2) 将目标各散射中心点的散射强度信息代入 RCS 的定标测量式(15), 从而获得各散射中心点的 RCS 值;

步骤 5 将以上各量代入 RCS 的计算式(16), 频率一定, 根据所求方位角度范围获得目标的 RCS 方位特性; 观测角度一定, 根据所求频率范围求得目标的频率响应。图 3 为该算法的流程图。

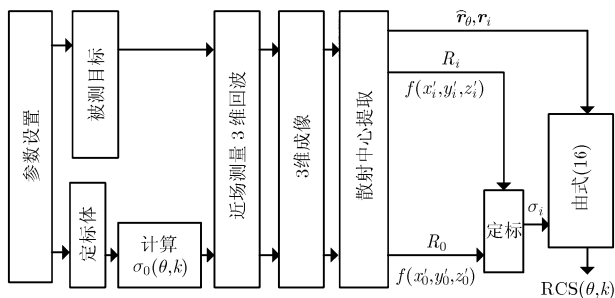


图3 基于3维SAR成像的RCS近远场变换算法流程图

4 仿真实验

本实验利用 FEKO 软件建立模型, 通过发射步进频率信号获得用于满足成像分辨率所需带宽, 使用物理光学(Physical Optics, PO)算法计算得到目标的回波数据, 再经过成像算法(3 维波数域算法)和 RCS 近远场变换算法得到目标的 RCS, 实验参数如表 1 所示。

表1 实验参数

载频 (GHz)	带宽 (GHz)	目标中心 (m)	虚拟面阵 (m)	面阵中心 (m)
2	1	(0,0,-2)	2×2	(0,0,0)

图 4, 图 5 分别为定标体的 3 维波数域算法成像结果和 FEKO 软件仿真所得的 RCS 频率响应曲线。

从图 4 可以看出定标体散射中心点在(0,0,-2)处, 提取散射强度最大值为 0.003434。从图 5 中可以获得定标体在 2 GHz 时的 RCS 值为 -52.5

dBsm²。

在 FEKO 中建立如图 6 所示的 5 个点目标模型, 图 7 是该模型的 3 维波数域算法成像结果。通过图 7 可以提取 5 个点目标散射中心坐标分别为(0,0,-2.00), (-0.30,0,-2.00), (0.30,0,-2.00), (0,-0.30,-1.85), (0,0.30,-2.30), 5 点散射强度分别为 0.003616, 0.002777, 0.002777, 0.002805, 0.002974。

图 8, 图 9 是通过本文的 RCS 近远场变换方法所得的 RCS 方位特性曲线, 其中, 频率为 2.0 GHz。从图 8, 图 9 可以看出经过基于 3 维 SAR 成像近远场变换算法反演得到的 RCS 曲线和 FEKO 计算的 RCS 理论曲线变化趋势是一致的, 两种曲线的峰值和拐点的位置相同, 这说明通过基于 3 维 SAR 成像的 RCS 近远场变换算法能得到高精度的目标 RCS 值。但是理论 RCS 曲线和经过近远场算法反演的 RCS 方位特性曲线的幅度值又存在一定的误差, 这是因为理论上 5 个完全相同的散射点经成像处理后定标得到的各自的 RCS 值原本应该是一致的, 理论上各散射中心点在 2.0 GHz 时的 RCS 应该都是 -52.50 dBsm², 但是由于成像算法的不够精确, 如经过本文的 3 维成像算法和定标处理后得到的 5 个散射点的远场 RCS 分别为 -52.05, -54.24, -54.24, -54.82, -52.46 dBsm², 这样各点 RCS 幅度上分别存在 0.44, -1.74, -1.74, -2.32, 0.03 dBsm² 的误差, 由于幅度上误差的存在将使得反演 RCS 与理论 RCS 曲线在幅度上也存在一定的误差, 并且这种幅度误差随着观测角的变化而变化。

图 10 是当观测点位于 Z 轴正上方、发射频率为 1.5~2.5 GHz 时目标通过本文的 RCS 近远场变换方法所得的 RCS 频率特性。从图 10 中可以看出通过基于 3 维 SAR 成像的近远场变换算法反演得到的 RCS 值和 FEKO 计算得到的理论值在变化趋势上完全一致, 在幅度上虽然存在误差, 但是二者总体上相差不大, 这就充分验证了本文 RCS 近远场变换算法的有效性。

总之, 通过仿真实验, 可以看到利用本文的基于 3 维 SAR 成像的 RCS 近远场变换算法能够获得高精度的目标的 RCS 的方位特性和频率特性。然而由于成像算法的不够精确, 造成对于完全相同的 5 个点目标经过 3 维 SAR 成像后的聚焦程度各不相同, 这样使得经过散射中心的提取算法所提取得到的 5 个点的散射强度也不相同, 进而导致通过近远场变换算法反演得到目标整体 RCS 存在一定的误差, 如何进一步提高基于 3 维 SAR 成像的 RCS 近远场变换的精度是我们下一步的重点研究内容。

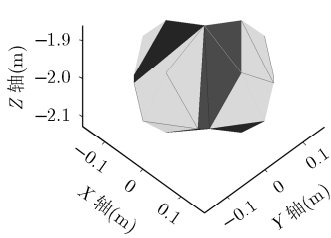


图 4 定标体 3 维 SAR 成像结果

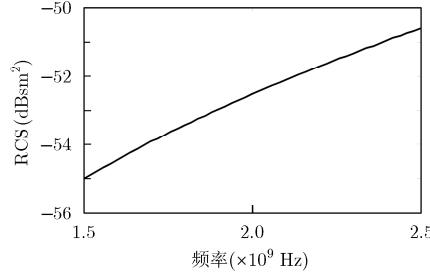


图 5 定标体 RCS 频率响应曲线

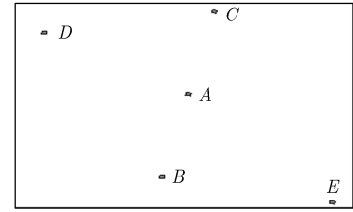


图 6 5 点目标 CADFEKO 模型

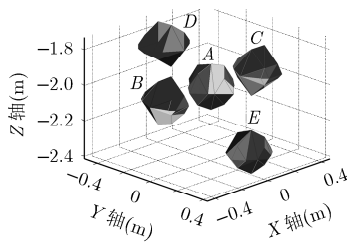


图 7 5 点目标的 3 维 SAR 成像结果

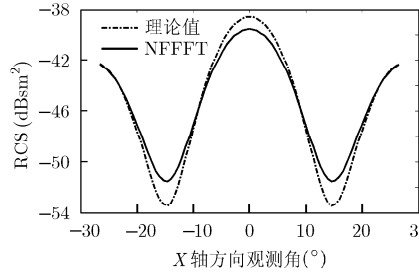


图 8 2.0 GHz 时 RCS 随 X 轴方向角度变化曲线

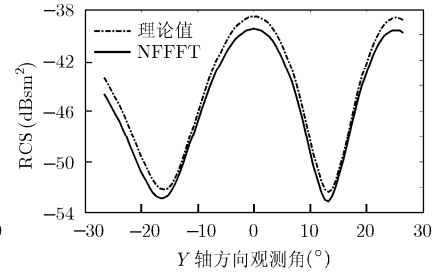


图 9 2.0 GHz 时 RCS 随 Y 轴方向角度变化曲线

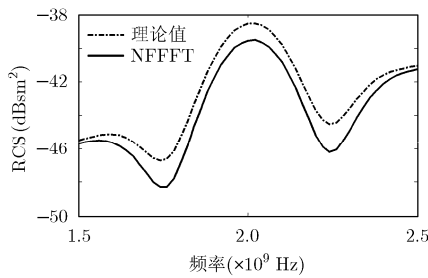


图 10 观测点位于 Z 轴正上方时 RCS 的频率响应

5 结束语

基于 Stratton-Chu 电场积分方程, 本文对 3 维 SAR 的近场波数域成像过程的物理意义进行了解释。基于该解释, 提出了一种基于 3 维 SAR 成像的 RCS 近远场变换算法。该算法利用 3 维 SAR 成像技术和平面波谱展开技术, 通过从近场 3 维 SAR 图像中提取出目标的 3 维位置信息和散射中心点的散射强度信息, 再对这些信息经过定标处理, 以得到各散射点远场 RCS, 最后利用近远场变换公式即可求得所需频率和所需方位角度的远场 RCS。最后通过仿真实验结果与 FEKO 软件计算结果的远场 RCS 对比, 该 RCS 近远场变换算法的有效性得到了验证。

参考文献

[1] 黄培康, 殷红成, 许小剑, 等. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 1-40.
Huang Pei-kang, Yin Hong-cheng, Xu Xiao-jian, et al. Radar

Target Characteristics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 1-40.

[2] 张麟兮, 李南京, 胡楚峰, 等. 雷达目标散射特性测试与成像诊断[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009: 51-96.
Zhang Lin-xi, Li Nan-jing, Hu Chu-feng, et al. The Test and Diagnostic Imaging of Radar Targets' Scattering Characteristics[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2009: 51-96.

[3] Osipov A, Kobayashi H, and Suzuki H. An improved image-based circular near-field-to-far-field transformation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(2): 989-993.

[4] Cariou R and Massaloux P. Near field far field transformation: calculation and application[C]. Proceedings of the IEEE International Symposium Antennas and Propagation Society, Chicago, IL, USA, 2012: 1-2.

[5] 师君. 双基地 SAR 与线阵 SAR 成像原理与技术研究[D]. [博士论文], 电子科技大学, 2009: 137-175.
Shi Jun. Research on principle and technique of bistatic SAR and linear-array SAR[D]. [Ph.D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2009: 137-175.

[6] Wang Y, Zhang X, Li W, et al. Motion measurement errors analysis for the 'one-active' LASAR[C]. Proceedings of the IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium 2009, Cape Town, South Africa, 2009: 562-565.

[7] Shi J, Liao K, Zhang X, et al. Three-dimensional SAR with fixed transmitter and its scattering explanation[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2013, 133(1): 285-307.

[8] Sheppard C J R, Choudhury A, Gannaway J, et al.

- Electromagnetic field near the focus of wide-angular lens and mirror systems[J]. *IEE Journal on Microwaves, Optics and Acoustics*, 1977, 1(4): 129-132.
- [9] Liao K, Xu S, Zhang X, *et al.* Simulation of 3-D SAR imaging based outdoor RCS measurement technique[C]. Proceedings of the Electromagnetics Research Symposium, Taipei, China, 2013: 589-593.
- [10] Woo J C, Lim B J, Lee S M, *et al.* Near-field-to-far-field transformation using wavenumber migration technique for a 3D spotlight SAR[C]. Proceedings of the Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Seoul, Korea, 2011: 1-4.
- [11] Garcia D, Tarnec L L, Muth S, *et al.* Stolt's $f-k$ migration for plane wave ultrasound imaging[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2013, 60(9): 1853-1867.
- [12] 翟伟刚. 目标散射特性近场测量方法研究[D]. [硕士论文], 西安电子科技大学, 2012: 47-70.
Zhai Wei-gang. Research on near-field measurement of targets' scattering characteristics[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2012: 47-70.
- [13] 童广德, 徐秀丽, 李加亮. 基于目标 ISAR 图像的 RCS 数据外推方法[J]. 制导与引信, 2007, 28(2): 28-31.
Tong Guang-de, Xu Xiu-li, and Li Jia-liang. RCS data extrapolation technology based on target's ISAR image[J]. *Guidance & Fuze*, 2007, 28(2): 28-31.
- [14] 何云涛, 江月松, 钟宇. CLEAN 算法在机载毫米波综合孔径成像中的应用[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(7): 1757-1760.
He Yun-tao, Jiang Yue-song, and Zhong Yu. An application of the CLEAN algorithm in airborne mm-wave synthetic aperture imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(7): 1757-1760.
- [15] Knott E F, Shaeffer J F, and Tuley M T. Radar Cross Section, Its Prediction, Measurement and Reduction[M]. Dedham, MA, Artech House, 1985: 47-187.
- 张晓玲: 女, 1964 年生, 博士, 教授, 研究方向为合成孔径雷达系统、雷达信号处理.
- 陈明领: 男, 1987 年生, 硕士生, 研究方向为 3 维 SAR 成像.
- 廖可非: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为 3 维 SAR 成像、雷达信号处理.