

海面 SAR 时域回波信号可视化仿真计算

南华¹ 方宁² 苏珉²

(1. 试验物理与计算数学国家重点实验室 北京 100076; 2. 北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘要: 利用计算机来模拟合成孔径雷达回波信号是雷达系统仿真中重要的一部分。借助雷达目标的高频电磁散射特性,运用图形电磁计算方法,开发了可快速、有效地获取合成孔径雷达回波信号的方法,可为合成孔径雷达成像提供原始的雷达回波数据。以起浪海面为目标实例,利用海浪频谱构建海面的几何模型,针对此海面模型,运用高频散射机理,实时可视化地计算其电磁波回波场强以及模拟出时域回波信号。利用条带式合成孔径雷达成像方法,通过该回波信号仿真出海浪面的合成孔径图像,验证了该方法有效性。

关键词: 电磁散射; 图形电磁计算; 合成孔径雷达

中图分类号: TN955 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

The visual computation of the SAR echo signal of the sea in time region

Nan Hua¹ Fang Ning² Su Min²

(1. The National Key Lab of Computational Mathematics And Experimental Physics, Beijing 100076, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The study of the valid simulation method of the echo signal of the sea surface for synthetic aperture radar is one important part of the radar simulation system. Using the characteristics of the high frequency electromagnetic scatter, one method building the radar echo signal of the sea surface in the time region by the mean of Graphic Electromagnetic Computation is established, including the construction of the sea model, the computation of the echo filed strength and the echo time signal. Based on the principle of the Stripmap SAR, the results prove this method to be valid.

Keywords: electromagnetic scattering; graphical electromagnetic computing; synthetic aperture radar(SAR)

1 引言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)由于具有全天时、全天候、高分辨率等特点,得到各国的广泛重视。相比于实际测量,通过仿真技术来获得复杂目标的 SAR 回波信号与图像则显得更加容易、方便、价廉。因此在复杂目标的 SAR 成像研究中,回波信号仿真技术能够提供大量的数据支持,对 SAR 成像算法设计、系统验证、图像几何校正、地理编码以及图像解译等研究具有重要意义,在自动目标识别的系统和算法设计研究领域中有广阔的应用前景。复杂目标的回波信号和成像仿真与针对 SAR 系统的仿真不同,它需要模拟电磁波的各种散射机理,如面元散射、棱边尖顶绕射、多次散射、涂覆材料介质散射等,由此生成的回波应包含目标散射电磁波的幅度、相位、极化、带内响应及孔径内响应等信息。

国内外对于 SAR 回波信号仿真的研究和应用取得了不错的效果,国内外学者依据不同的电磁计算方法和 SAR 仿

真模型已提出多种方法;文献[1]给出了一种针对复杂地形的 SAR 仿真方法,利用高度数据和面元近似来模拟地形的起伏表面,利用射线法来解决阴影区的计算问题,但只考虑了面元散射机理,难以适用复杂目标;文献[2]运用双尺度分形和小面元模型来模拟自然地形,能较好的模拟 SAR 图像的相干斑和几何畸变特征,但其回波仿真散射机理过于简单,也不适用于复杂目标的回波计算;文献[3]利用距离多普勒分辨单元对海面进行划分,分析海杂波的功率谱密度及其电磁散射系数,计算出海杂波的模拟信号,而该方法并未直接用于 SAR 成像;西班牙学者^[4]利用图形电磁计算的方法进行 SAR 仿真,其优点是电磁计算可用显卡加速,实时性好,综合考虑了多种散射机理,主要适用于高频段的复杂目标散射计算,但其应用有一定的局限性,只能直接生成 SAR 图像,不能针对 SAR 工作模式生成原始回波信号。

针对上述研究现状,本文提出了一种基于目标高频电磁散射特性计算的背景目标 SAR 回波可视化仿真算法。

该算法基于图形电磁学,利用 OpenGL 机制通过计算机屏幕将雷达照射目标的过程可视化,并在可视化过程中计算雷达所照射区域的散射场强,进而与雷达发射的时域信号进行卷积获得该目标的 SAR 时域回波信号,为 SAR 成像提供信号数据。在此基础上,对得到的回波信号进行距离多普勒成像算法处理,即可得到目标仿真 SAR 图像。

2 条带式 SAR 成像原理

假定雷达发射的是调频率为 K_r 的线性调频脉冲,在条带式 SAR 工作模式下,目标区域与雷达间的几何关系如图 1 所示,被解调至基带的点目标 SAR 回波时域信号模型^[5]为:

$$s_0(\tau, \eta) = a_0 \omega_r \left[\tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right] \omega_a(\eta - \eta_c) \cdot \exp \left\{ \frac{-j4\pi f_0 R(\eta)}{c} \right\} \cdot \exp \left\{ j\pi K_r \left[\frac{\tau - 2R(\eta)}{c} \right]^2 \right\} \quad (1)$$

式中: a_0 为点目标的回波强度, τ 为距离时间, η 为近距方位时间, η_c 为波束中心偏离时间, ω_r 为距离包络(矩形窗函数), ω_a 为方位包络(sinc 平方型函数), f_0 为雷达中心频率, $R(\eta)$ 为瞬时斜距, c 为光速。

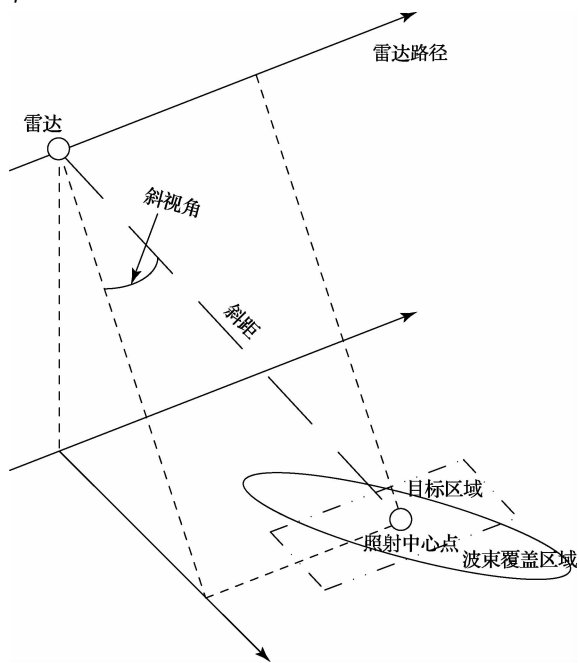


图 1 雷达与目标区域位置关系示意

采用距离多普勒算法,将式(1)的点目标进行成像处理,经距离压缩、距离徙动校正和方位压缩后,信号变为:

$$s_{ac}(\tau, \eta) = a_0 p_r(\tau - 2R_0/c) p_a(\eta) \cdot \exp\{-j4\pi f_0 R_0/c\} \cdot \exp\{j2\pi f_0 \eta\} \quad (2)$$

式中:压缩脉冲包络 p_r 为窗函数 ω_r 的傅里叶变换, $p_a\{\theta(\eta)\} = \omega_a(\eta)$, θ 为雷达至点目标的方向矢量与雷达至照射中心的方向矢量之间夹角。

在式中, a_0 为点目标的散射强度,是一常量,不随雷达入射频率的变化而变化。然而,真实的雷达目标散射强度不仅是雷达入射频率的函数,也是电磁波入射方向的函数,故复杂目标的时域回波信号应表示为:

$$s(\tau, \eta) = [w_r(\tau) w_a(\eta - \eta_c) \exp(j\pi K_r \tau^2)] \otimes a(\tau) \quad (3)$$

式中: $a(\tau)$ 可看作是目标的时域冲激响应,可表示为:

$$a(\tau) = \text{IFFT}(E^*(f)) \quad (4)$$

它由目标的频域散射强度 $E^*(f)$ 经傅里叶变换求得,对于海面目标而言,其散射强度可通过高频散射理论进行计算。

3 海面几何模型

在计算海面目标散射强度前,需要建立海面的几何模型。在海洋学中,海浪频谱是描述海浪的主要途径之一,也将海浪运动看成复杂的随机过程,利用其频谱来描述这一过程^[6]。三维海面的模拟可由多数余弦波叠加而成,如下式所示:

$$h^s(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n^s \cos[\omega_n^s t - k_n^s(x \cos \theta_n^s + y \sin \theta_n^s) + \epsilon_n^s] \quad (5)$$

式中:第 n 个组成波的振幅为 a_n^s 、频率为 ω_n^s 、初相为 ϵ_n^s 、 k_n^s 为波数,该组成波在 XY 平面上的传播方向与 x 轴成夹角 θ_n^s , $-\pi \leq \theta_n^s \leq \pi$ 。根据线性波浪理论,对于深水波的频率有 $(\omega_n^s)^2 = k_n^s g$ 。

振幅 a_n^s 与方向谱密度函数 $S^s(\omega^s, \theta^s)$ 的关系如下:

$$S^s(\omega^s, \theta^s) d\omega^s d\theta^s = \sum_{\Delta\omega^s} \sum_{\Delta\theta^s} \frac{1}{2} (a_n^s)^2 \quad (6)$$

理论上 θ^s 的变化范围为 $-\pi \sim \pi$,实际上海浪能量主要分布在主波方向的两侧各 $\frac{\pi}{2}$ 范围内。方向谱的一般形式可如下表示:

$$S^s(\omega^s, \theta^s) = S^s(\omega^s) G^s(\omega^s, \theta^s) \quad (7)$$

式中: $S^s(\omega^s)$ 为海浪频谱, $G^s(\omega^s, \theta^s)$ 为海浪方向分布函数,简称方向函数。在模拟起浪海面时采用的方向函数是根据波浪立体观测计划(stereo wave observation project, SWOP)得到的公式^[7]:

$$G^s(\omega^s, \theta^s) = \frac{1}{\pi} (1 + p \cos 2\theta^s + q \cos 4\theta^s) \quad (8)$$

$$p = 0.5 + 0.82 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\omega^s}{\omega_m^s} \right)^4 \right] \quad (9)$$

$$q = 0.32 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\omega^s}{\omega_m^s} \right)^4 \right] \quad (10)$$

式中: $|\theta^s| \leq \frac{\pi}{2}$, ω_m^s 为 $\frac{\partial S^s(\omega^s)}{\partial \omega^s} = 0$ 处的谱峰频率。

4 散射强度的可视化计算

研究计算目标电磁散射特性的方法很多^[8],有数值方法、高频渐进法、部件分解法、图形电磁计算法等。在利用

式计算海面的几何模型后,即可利用高频散射理论计算目标的散射强度,而图形电磁计算方法是其中的有效方法之一。图形电磁计算(graphical electromagnetic computing, GRECO)是 Juan, M. Rius 等人为克服传统高频计算方法在计算存储量、计算精度和计算速度等方面的缺陷而提出的^[9]。该方法利用 OpenGL 机制将雷达照射区域实时显示在计算机屏幕,并将雷达波入射方向设为视线方向,此时屏幕可见部分即为贡献散射强度的区域,而不可见部分则被计算机硬件自动消隐掉。

利用 GRECO 方法计算海杂波 SAR 信号回波过程中,需要进行 SAR 坐标系与 GRECO 坐标系的转换,二者之间的相互关系如图 2 所示。图中 (x', y', z') 表示 GRECO

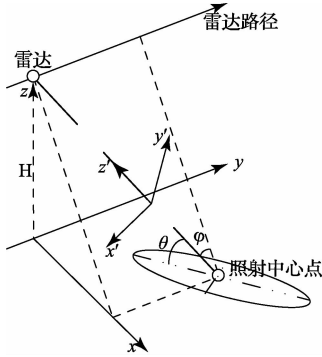


图 2 GRECO 坐标系与 SAR 坐标系关系示意

坐标系, (x, y, z) 表示 SAR 坐标系,由于条带式 SAR 运动的特性,雷达视线在 SAR 坐标系中保持不变,照射区域随雷达的移动而移动并保持大小不变,故在 OpenGL 投影体系中,可利用投影框模拟雷达照射区域的运动状态,保持在 x' 和 y' 方向的投影大小不变,即可获得 SAR 运动中目标相对雷达的位置和角度关系。

通过设置特定的光照模型,在屏幕上即可获得某一时刻下有散射贡献的目标区域,此时由屏幕象素点的红绿蓝三颜色分量 (R, G, B) 可以求得对应目标表面上该象素点的法向矢量 \hat{n} 。象素点的 (x', y', z') 值也可分别从屏幕坐标系中的相对位置和深度缓存 (z -buffer) 获得。根据物理光学理论可得其后向散射场^[10]:

$$\vec{E}^s(f) = -\frac{jke^{-jkR}}{4\pi R} \hat{s} \times \int_s [\hat{n} \times \vec{E} - \eta \hat{s} \times (\hat{n} \times \vec{H})] e^{j\hat{r} \cdot \vec{s}} ds \quad (11)$$

式中: \hat{s} 表示散射方向单位矢量, η 表示阻抗, \vec{E} 和 \vec{H} 是目标处的场强, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。根据极化方向从 $\vec{E}^s(f)$ 中取 $E^s(f)$ 即为所要求的散射场,即可利用式(3)和式(4)求得该目标的时域回波信号。

5 仿真实例

运用本文所述的方案,利用式(5)对海面风速为 10 m/s 时

的海浪进行几何建模,得到某一时刻海浪模型如图 3 所示。

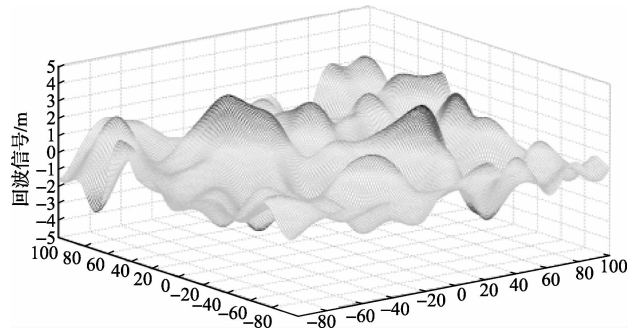


图 3 海面风速为 10 m/s 时某一时刻海浪模型

对低斜视下该海浪模型进行 SAR 信号的回波模拟,设置雷达的有效速度为 150 m/s,波束斜视角为 3.5° ,景中心斜距为 20 km,雷达发射脉冲时宽为 $2.5 \mu s$,距离调频率为 $20E12$ Hz/s,雷达的工作频率为 5.3 GHz,距离分辨率和方位分辨率分别为 2.7 m 和 1.7 m。经计算,海浪的时域回波信号如图 4 所示。

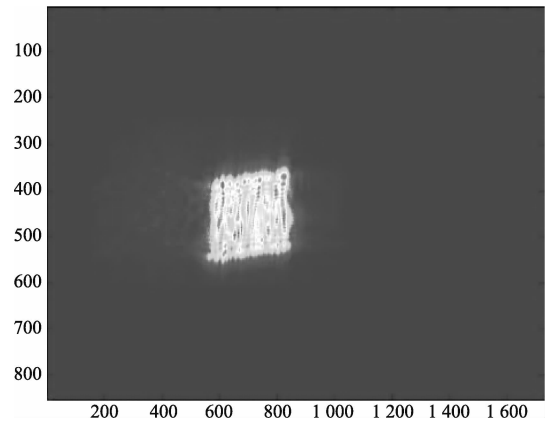


图 4 海浪的 SAR 回波时域信号

在此基础上,对得到的回波信号进行距离多普勒成像算法处理(为简单起见,采用简单的成像算法),即可得到海浪的仿真 SAR 图像。图 5 给出了经 SAR 成像算法后所得

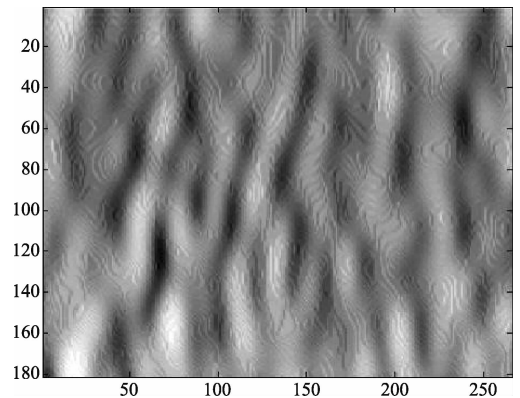


图 5 海浪的 SAR 成像

图像。在 SAR 成像图中可以看出波浪的起伏,这些起伏与海浪模型中的高低起伏一一对应,成像结果验证了本文仿真方法的有效性。该方法可进一步采取优化措施,可望获得更清晰的图像。

6 结 论

目标 SAR 图像仿真对 SAR 成像算法设计、系统验证、图像几何校正、地理编码以及图像解译等研究具有重要意义,同时在目标识别领域中有着广阔的应用前景。面向复杂背景目标的 SAR 成像问题,研究了基于 GRECO 高频电磁散射特性计算的海面的 SAR 图像仿真方法。该方法首先根据 SAR 平台参数以及 SAR 成像几何,可视化计算目标电磁散射特性,在此基础上,进一步根据 SAR 系统参数,生成 SAR 原始回波数据,最后再对其进行距离多普勒成像算法处理,即可得到目标仿真 SAR 图像。文中通过实际目标的 SAR 图像仿真实验结果验证了该方法的有效性。

作为 SAR 图像仿真的方法研究,在目前的仿真中,主要针对回波信号的模拟与验证。为了简化起见,只考虑了简单的距离多普勒成像算法,后续将进一步考虑更多的影响因素,研究和完善其 SAR 成像处理。

参考文献

- [1] FRANCESCHETTI G, MIGLIACCIO M, RICCIO D, et al. SARAS: a synthetic aperture radar (SAR) raw signal simulator [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(1): 110-123.
- [2] 孙尽尧, 孙洪. 自然场景 SAR 图像的仿真[J]. 雷达科学与技术, 2003(4): 210-214.
- [3] 凌祥, 王夷, 赵雷鸣, 等. 二维距离-多普勒海杂波信号模拟与实现方法[J]. 电子测量技术, 2014, 37(5): 108-111.

- [4] MARGARIT G, MALLORQUI J J, RIUS J M, et al. On the usage of GRECOSAR, an orbital polarimetric SAR simulator of complex targets, to vessel classification studies [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(12): 3517 - 3526.
- [5] IAN G C, FRANK H W, 洪文, 等. 合成孔径雷达成像—算法与实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [6] 杨怀平, 孙家广. 基于海浪谱的波浪模拟 [J]. 系统仿真学报, 2002, 14(9): 1175-1178.
- [7] 俞聿修. 随机波浪及其工程应用 [M]. 3 版. 大连理工大学出版社, 2003.
- [8] 贾建科. 标准目标电磁散射特性研究 [J]. 国外电子测量技术, 2011, 34(2): 17-19.
- [9] RIUS J M, FERRANDO M, JOFRE L. Highfrequency RCS of complex radar targets in real-time [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, 41(9): 1308-1319.
- [10] 王帅雷, 方宁, 渠慎丰. 过密等离子体包覆目标的散射特性分析 [J]. 电子测量技术, 2010, 33(12): 12-15.

作者简介

南华, 1964 年出生, 研究员, 分别于 1987 年、2005 年在北京邮电学院应用物理系应用物理专业、中国运载火箭技术研究院飞行器设计专业获学士、硕士学位, 现为试验物理与计算数学国家重点实验室研究员, 曾获国防科技进步一等奖一项、二等奖三项。主要研究方向为雷达目标电磁散射特性应用、目标特征提取等。

E-mail: 13552245150@139.com