

3-25-2020

Maritime Radar Terrain Echo Simulation Based on DEM and SAR

Yongfeng Suo

Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China;

Shenhua Yang

Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China;

Guoquan Chen

Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China;

Zhuqiang Xiang

Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Maritime Radar Terrain Echo Simulation Based on DEM and SAR

Abstract

Abstract: Due to the huge amount of work required for terrain database building, the application of navigation radar simulation on the reflectivity of land object has been greatly limited. A novel radar simulation method is proposed based on the DEM(Digital Elevation Model) data and the same-band SAR(Synthetic Aperture Radar) reflection data. The target reflectance information is obtained, which is used as the basis for the surface radar reflectivity simulation. In combination with the radar equations, the surface reflectivity model of the navigation radar is established. Taking into account the elevation shielding relationship of the radar echo topography, an algorithm of terrain radar echo generation for navigation radar is yielded, and the model is implemented by the GPU programming. Experimental results prove that the proposed algorithm is closer to the real radar echo than the traditional simulation method, which can reflect radar reflectivity details and the echo image changing under different ranges.

Keywords

radar simulation, SAR(Synthetic Aperture Radar), DEM(Digital Elevation Model), radar reflectivity

Recommended Citation

Suo Yongfeng, Yang Shenhua, Chen Guoquan, Xiang Zhuqiang. Maritime Radar Terrain Echo Simulation Based on DEM and SAR[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(3): 518-524.

基于 DEM 和 SAR 的航海雷达地形回波仿真

索永峰, 杨神化, 陈国权, 向祝强

(集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 由于仿真地形数据库制图工作量巨大, 因此目前航海雷达仿真中物标雷达反射率模拟的工程应用受到极大限制。提出基于 DEM(Digital Elevation Model) 和同波段 SAR(Synthetic Aperture Radar) 数据反演, 获取物标反射率信息, 作为地表雷达反射率仿真的依据, 结合雷达方程, 建立航海雷达地表反射率模型; 考虑雷达回波地形的高程遮挡关系, 给出了航海雷达地形回波生成算法, GPU 编程实现。通过与传统仿真方法和真实雷达回波图像的比较, 表明该算法与真实雷达回波更接近, 更能体现地表回波图像的雷达反射率细节和不同量程下的回波图像变化。

关键词: 雷达仿真; SAR(Synthetic Aperture Radar); DEM(Digital Elevation Model); 雷达反射率

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 03-0518-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0275

Maritime Radar Terrain Echo Simulation Based on DEM and SAR

Suo Yongfeng, Yang Shenhua, Chen Guoquan, Xiang Zhuqiang

(Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Due to the huge amount of work required for terrain database building, the application of navigation radar simulation on the reflectivity of land object has been greatly limited. A novel radar simulation method is proposed based on the DEM(Digital Elevation Model) data and the same-band SAR(Synthetic Aperture Radar) reflection data. The target reflectance information is obtained, which is used as the basis for the surface radar reflectivity simulation. In combination with the radar equations, the surface reflectivity model of the navigation radar is established. Taking into account the elevation shielding relationship of the radar echo topography, an algorithm of terrain radar echo generation for navigation radar is yielded, and the model is implemented by the GPU programming. Experimental results prove that the proposed algorithm is closer to the real radar echo than the traditional simulation method, which can reflect radar reflectivity details and the echo image changing under different ranges.

Keywords: radar simulation; SAR(Synthetic Aperture Radar); DEM(Digital Elevation Model); radar reflectivity

引言

航海雷达回波的模拟主要基于 2 种方法, 一种

是基于 DEM 数据或 DEM 生成的三维地形数据通过图像处理的方法进行模拟^[1-5]; 另一种是基于电子海图数据通过计算机扫描图形填充的方法^[6]。前者的优势表现在 DEM 数据高层信息比较完善, 且较容易获得, 所得回波信息较为丰富, 但由于涉及大量图像处理的运算, 绘制效率受到限制, 硬件平台要求高; 后者的优势表现为绘制速度非常快, 数据量也小, 但是因为电子海图数据中所含高程数据



收稿日期: 2018-05-10 修回日期: 2018-11-21;
基金项目: 国家自然科学基金(51579114, 51879119), 福建省自然科学基金(2018J01484);
作者简介: 索永峰(1981-), 男, 河南沁阳, 博士, 副教授, 研究方向为航海仿真, 航海信息化。

<http://www.china-simulation.com>

有限, 所得图像精细度低, 所以锯齿现象严重。虽然有些研究者通过 DEM 数据与电子海图数据叠加, 以丰富电子海图数据的方式, 获得了较为丰富的回波, 但是因为算法是基于扫描线填充的方式, 造成回波信息棱角过于分明, 与真实雷达饱满圆润的回波效果存在较大的出入。以上所述 2 种方法, 虽然都比较好地描述了雷达无线电波的遮挡关系, 但在回波强弱和目标反射率上, 几乎都无法模拟。文献[7]提到了通过对电子海图数据增加回波反射率属性来模拟反射率, 但实际情况是反射率难以获得, 雷达模拟数据完全靠人工编辑, 数据制作工作量巨大, 几乎是无法完成的任务, 所以实际工程的应用很困难。相对于传统雷达回波生成方法, 本文提出了利用基于 DEM 和同波段 SAR 数据反演, 获取物标反射率信息, 作为航海雷达反射率仿真的依据; 结合传统雷达方程, 模拟雷达回波对地表反射率、雷达增益、雷达衰减等效果。

本文所述基于卫星 SAR 数据反演地表雷达反射率, 该值与航海雷达后向反射率存在相关性, 除了与目标微波反射特性相关之外, 还与入射角、极化方式等因素相关。本文研究两种数据源回波数据的在相同极化方式下, 同一地物的雷达回波的内在联系, 并通过仿真实验效果, 证明其可行性。

1 SAR 后向反射系数

1.1 Sigma nought

Radarsat-2 影像的原始数据, 后向反射系数增益偏移参数文件 lutSigma.xml 在所得数据包文件夹下, 包含两个参数: 偏移 offset 和增益 gains。其中整幅图像偏移 offset 为一个值, 增益 gains 与 SAR 影像数据像素点一一对应。sigma nought 值可由式(1)得到, 其中 DN 为 SAR 影像像元值, gains_j 为第 j 列像元的增益, offset 为偏移量^[8-9]。

$$\text{sigma nought} = (DN^2 + \text{gains}_j) / \text{offset} \quad (1)$$

对上述 sigma nought 影像取 10 为底的对数即可获取雷达后向散射亮度 β^0 影像, 见公式(2)。

$$\beta^0 = 10 + \log_{10}(\text{sigma nought}) \quad (2)$$

1.2 雷达入射角

对应图像中心点, 地球半径 r 的计算:

$$r = e_{\min} \frac{\sqrt{1 + \tan^2(\text{lat}\pi / 180)}}{\sqrt{e_{\min}^2 / e_{\text{maj}}^2 + \tan^2(\text{lat}\pi / 180)}} \times 10^3 \quad (3)$$

式中: e_{\min} 为地球椭球体长半轴(km); e_{maj} 为地球椭球体主长半轴(km); lat 为卫星平台地理纬度。

轨道高度的计算公式为:

$$h = e_{\text{maj}} - r \quad (4)$$

入射角计算公式为:

$$I_j = \cos^{-1}[(h^2 + RS_j^2 + 2rh) / 2rRS_j] \quad (5)$$

式中: h 为轨道高度; r 为地球半径; RS_j 为图像中第 j 列的斜距。

1.3 雷达后向散射系数

将式(2)~(5)带入式(6)可以获得雷达后向散射系数。

$$\sigma^0 = \beta^0 + 10 \times \log_{10} I_j \quad (6)$$

1.4 雷达后向反射系数

地物后向散射通常用后向反射截面积 σ 或后向反射系数 σ^0 来表达。对于反射模型的选择 Chapp^[9]等针对不同的粗糙面, 利用各向同性独立散射体模型, 把目标看作球状散射体集合, 提出了点散射体模型: $\sigma^0 = \sigma^0(\theta) \cos \theta$ 。其中 $\sigma^0(\theta)$ 为后向反射系数, θ 是入射角。方程两边相比可以得到, 同一雷达系统在不同入射角下的后向反射系数为:

$$\sigma_2^0 = \cos \theta_2 / \cos \theta_1 \sigma_1^0 \quad (7)$$

式(7)可以方便地把不同入射角的 SAR 图像, 换算到与航海雷达相同入射角下。式(7)的使用前提是地形较为平坦的仿真区域, 如果对于地形复杂区域仿真效果会受到影响。

文献[10-12]从电磁波观点分析了入射角与反射率之间的关系, 可分为如图 1 所示 3 个不同的区域: 接近擦地入射区, 平稳区和接近垂直入射区。在每一个区域中, 与入射角的关系可以表现出来, 见图 1。从图 1 不难看出, 在入射角不太大的情况下, 即在平稳区和接近入射角区, 入射角余角弧度

与 $10\log_{10}\sigma^0$ 成正比关系, 由此不难得出航海雷达单位反射面积与卫星 SAR 雷达单位反射面积之间的关系, 见式(8)。

$$\sigma_2 = \sigma_1 10^{K_2(\theta_2 - \theta_1)} \quad (8)$$

式中: K_2 为调整系数, 可理解为地表对入射角的敏感系数。其取值与 SAR 传感器性能, 所要仿真的航海雷达特点都有关系, 很难通过理论计算准确获得。通过反复试验, 基于 SAR 影像用于航海雷达反射率仿真, K_2 取值 0.15 时最终效果与真机回波最为接近。

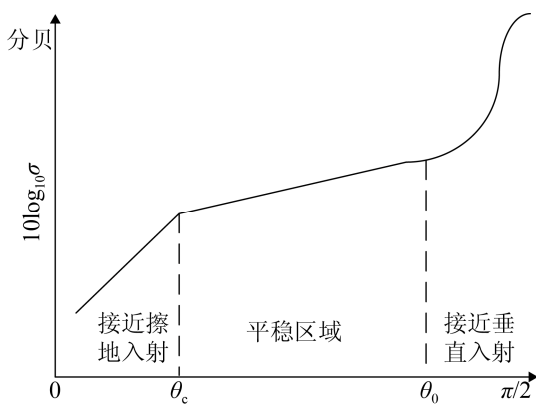


图 1 反射率与入射角的关系图

Fig. 1 Reflectivity and incident angle diagram

2 地表雷达反射率模型

2.1 雷达最大作用距离

雷达回波与发射的电磁波所照射地形性质有直接关系。因为有很多地形参数会影响回波, 所以这种关系是错综复杂的。雷达回波不仅受照射区域细微构造的影响, 甚至还受照射区域湿度的影响。事实上, 由于回波和地形之间的关系, 是随着发射波的入射角、发射波和接收波和接收波的极化方式以及雷达频率而变化的, 因此, 使得这种关系变的非常复杂。本文提出利用 SAR 回波模拟航海雷达回波, 必然要面对不同雷达系统, 不同入射角、极化方式等问题。好在每个天线单程雷达(即发射和接收共用一个天线), 都适用于通用雷达方程^[13-15]。

$$R_m = \left(\frac{P_p \cdot G^2 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_0 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 k \cdot T_0 \cdot B \cdot F_n \cdot SN \cdot L_s} \right)^{1/4} \quad (9)$$

式中: P_p 为发射机峰值功率; G 为天线增益; λ 为发射波波长; R 为天线和目标间的距离; σ 为 $\sigma_2 \cdot \sigma_0$ 的乘积物标雷达等效反射面积; F_n 为噪声因子; B 为接收机带宽; SN 为信噪比; T_0 为常数取 290K; k 为玻尔兹曼常数取 $1.380\ 658 \times 10^{-23}$ ws/k。公式中取值, 除常数之外参数取自某主流航海雷达性能参数, 见表 1。

表 1 某型主流航海雷达主要性能参数

Tab. 1 Main parameters of some general navigation radar

技术指标	值	技术指标	值
发射频率	9375 MHz	峰值功率	25 kW
信噪比	-13 dBm	天线增益	31.0 dBm
接收机带宽	5 MHz	脉冲宽度	0.06 μ s
PRF	1 000 Hz	虚警率	0.6%
发现概率	0.9	极化方式	H
水平波束宽度	1.0°	垂直波束宽度	15°

在雷达仿真系统中, 通常雷达扫描一周被定为 360 线, 如图 2 所示。

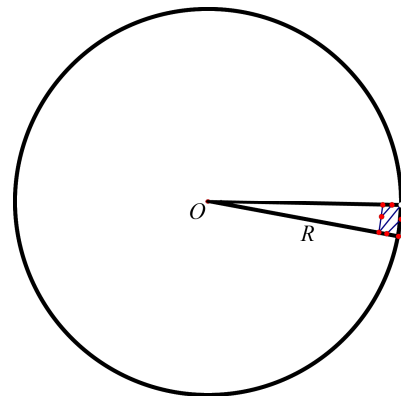


图 2 雷达反射距离示意图

Fig. 2 Radar reflection distance diagram

图 2 中, 每度所对应的雷达反射面积可用式(10)表达, 其中 R 为物标距离, 显然目标可探测距离小于雷达理论最大探测距离 R_m , 满足公式(11)。

$$\sigma_0 = (\pi R / 180)^2 \quad (10)$$

$$R \leq R_m \quad (11)$$

以雷达方程为基础, 可以推导出数字雷达的最大作用距离。将公式(9)~(10)代入公式(11)得公式:

$$\frac{P_p \cdot G^2 \cdot \sigma_2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 k \cdot T_0 \cdot B \cdot F_n \cdot SN \cdot L_s} \geq R^2 \quad (12)$$

2.2 坐标系转换

DEM 数据和 SAR 数据都是基于笛卡尔坐标的光栅数据, 而雷达扫描计算最方便的是极坐标系, 因此需要把极坐标转换成笛卡尔坐标。极坐标系和笛卡尔坐标系的对应关系如图 3 所示。

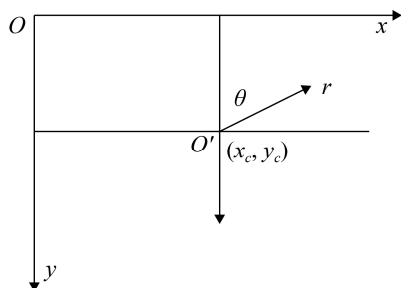


图 3 极坐标与平面直角坐标转换示意图

Fig. 3 Polar and rectangular plane coordinate transformation diagram

以 O' 点为原点的极坐标系和以 O 点为原点的屏幕直角坐标系的转换关系为见式(13), 其中 resolution 为光栅数据分辨率, 单位为 m/像素。

$$\begin{cases} x = x_c + r \sin \theta \\ y = y_c - r \cos \theta \\ r = DN \times \text{resolution} \end{cases} \quad (13)$$

2.3 回波生成算法

海上观察陆地地貌复杂多变, 普遍存在靠近本船海拔高物标遮挡后方海拔低物标的问题。而利用 DEM 数据进行扫描判断遮挡关系非常方便, 可以通过依次判断各点的遮挡关系, 决定是否绘制。如图 4 所示, 实际物标遮挡关系除了和物标高度有关, 还与物标距离有关。可以通过天线到物标高度的正切值判断是否遮挡。

$$\tan \alpha = (H - h) / R \quad (14)$$

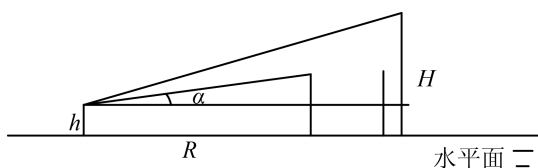


图 4 雷达地形遮挡关系示意图

Fig. 4 Radar terrain echo occlusion issue diagram

算法实现时, 从模拟量程最大处, 按照步长由远及近逐步判断遮挡关系。算法具体描述如下:

```

Input:  step, position,  $\theta$ , range
Output:  void
BEGIN
 $r \leftarrow 0$ ;
 $\theta \leftarrow 0$ ;
Do While  $\theta < 360$ 
  Do While  $r > 0$ 
     $r \leftarrow \text{range} - \text{step}$ ;
     $x \leftarrow \text{position}.x + r \sin \theta$ ;
     $y \leftarrow \text{position}.y - r \cos \theta$ ;
    hMax  $\leftarrow$  calculate  $\tan \alpha$  from equation 14;
    calculate and check  $R$  from equation 12;
    If check True
      calculate  $\sigma_2$  from equation 8;
      draw every pixel from  $r$  to  $r + \text{step}$ ;
    End If
  End Do
   $\theta \leftarrow \theta + 1$ ;
End Do
END

```

2.4 模型算法实现

模型算法实现中间过程数据如图 5 所示。其中图 5(a)~(b)为 2016 年厦门港附近 DEM 数据以及灰度化的 DEM 数据。图 5(c)为 2016 年同一地区通过式(6)处理的初级 SAR 影像。图 5(d)为经过式(8)处理后的影像。图 5(e)为通过公式(14)处理后的雷达回波图像。图 5(f)为模型处理的最终结果。

选取其中一条扫描线, 如图 6 所示。5 条折线分别体现了扫描线上, 灰度图 DEM 数据(对应图 5(b))、SAR 数据(对应图 5(c))、RADAR 反射率(对应图 5(d))、DEM 扫描数据(对应图 5(e))和模型处理最终数据(对应图 5(f)), 即 RADAR 反射率扫描结果。其中模型最终结果数据由于在横坐标上会与 DEM 扫描数据部分重合, 所以做了反向处理, 对称显示在横坐标以下, 其结果与符号无关。

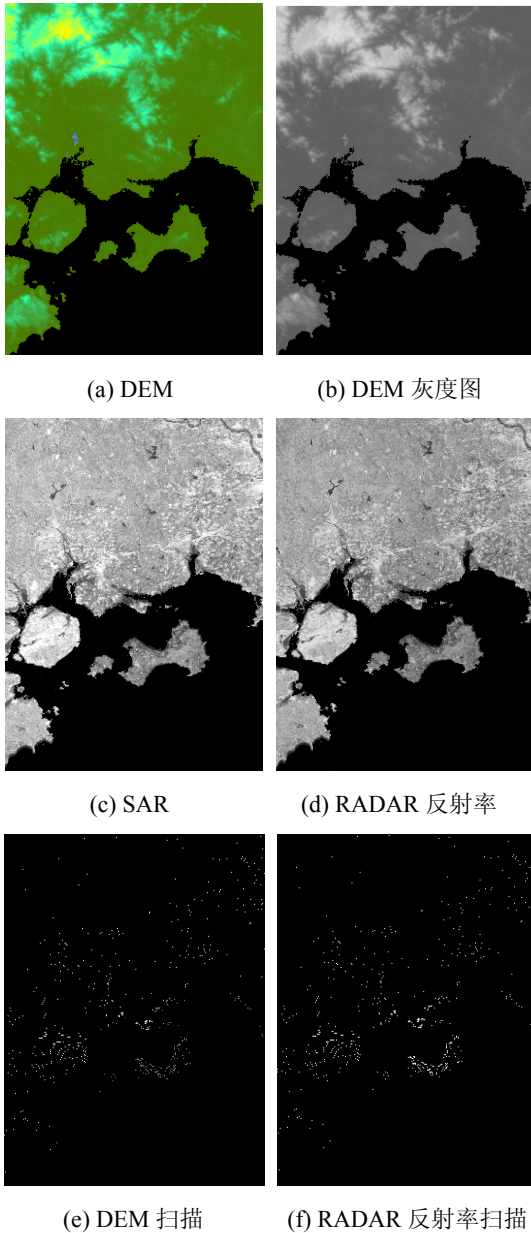


图 5 回波生成算法仿真

Fig. 5 Echo generation algorithm simulation

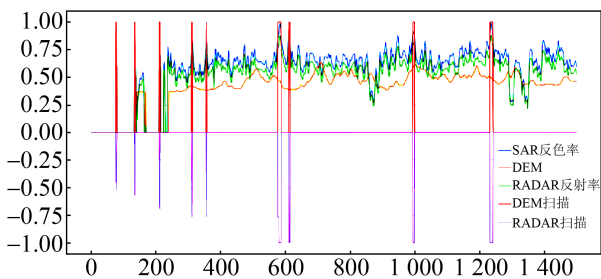


图 6 一条扫描线数据

Fig. 6 A scanning line data chart

本文所述方法计算量较大, 为保证仿真系统运

行实时性, 采用 GPU 编程方式, 利用 GPU 提供的片元着色器, 实现像素颜色的计算。实践证明在保证 360 线, 每线 1 024 步长的情况下, 可以得到很好的流畅度, 可以满足实时仿真系统的性能要求。实现计算机配置为: Intel Core i5-6300 4 核心处理器, 内存 4GB DDR, 操作系统 win10 64 位, 显卡 NVIDIA GeForce GTX 750, 可以保证渲染帧率高于 30 fps。实际应用中为了支持大范围的雷达数据仿真, 还需要建立数据金字塔结构, 实现雷达数据的动态加载。因不是本文重点内容, 此处不再赘述。

3 仿真实验

本文基于卫星 SAR 数据反演地表雷达反射率, 在分析其与航海雷达后向反射率相关性的基础上, 建立了航海雷达地表反射率模型并通过 GPU 编程实现。实验以厦门港为例, 选择青屿水道万吨轮航道、东渡航道、嵩屿码头水域, 3 个方向交通流交汇处, 如图 7 所示。



图 7 厦门港水域海图及 SAR 影像

Fig. 7 Xiamen port chart and SAR image

该水域海沧嵩屿码头从 SAR 影像来看, 由于多为码头人工水泥设施或者码头机械组成, 均为雷达高反射地形物标; 而右侧鼓浪屿地表多为植被等低反射物标, 存在明显的层次特征, 其回波受增益调节影响明显。仿真结果如图 8~9 所示, 左侧嵩屿码头地形高反射回波受增益减少影响, 整体轮廓完整, 部分细节逐步缺失; 右侧鼓浪屿地形回波随着增益减小, 出现明显的轮廓变化。

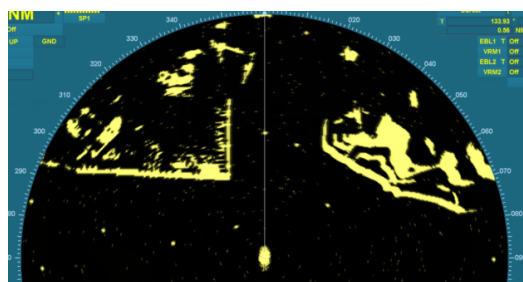


图 8 增益 75% 仿真雷达回波
Fig. 8 Gain 75% Radar simulation echo

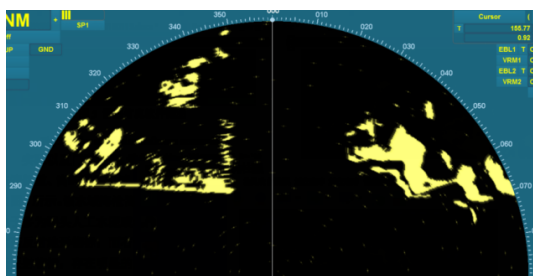


图 9 增益 25% 仿真雷达回波
Fig. 9 Gain 25% Radar simulation echo

与图形扫描和填充的方法实现效果相比如图 10 所示, 基于 DEM 和 SAR 数据的航海雷达仿真结果随着增益的调节地物回波陆续体现, 且没有明显的锯齿, 与真实雷达的回波(如图 11 所示)更接近, 能够更好地体现地表回波图像的雷达反射率细节。

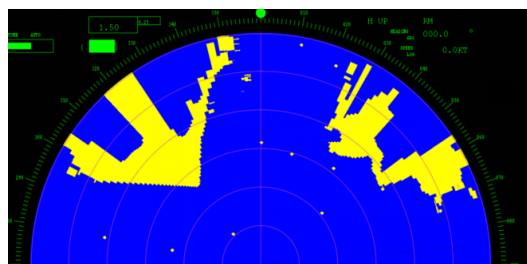


图 10 扫描图形填充仿真雷达回波
Fig. 10 Radar simulation echo based on scan and fill

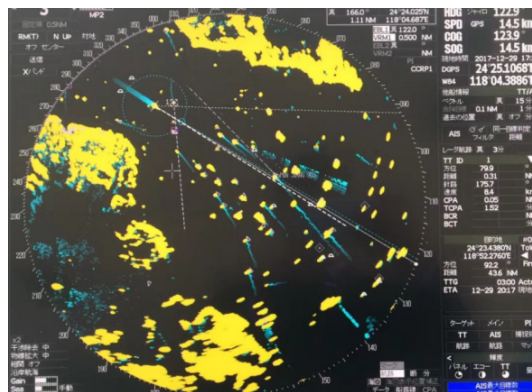


图 11 真机 JRC 航海雷达软件截图
Fig. 11 Real JRC radar software screenshot

4 结论

本文提出基于 DEM 和同波段卫星 SAR 数据进行反演, 相比现有航海雷达地形仿真的常用方法, 本文方法根据同波段雷达反射率与入射角关系曲线的平稳区域线性好的特征, 获取物标反射率信息, 作为航海雷达地表反射率仿真的依据, 结合雷达方程, 建立航海雷达地表反射率模型; 考虑雷达回波地形的高程遮挡关系, 给出了航海雷达地形回波生成算法, 最后利用 GPU 编程实现。通过与传统矢量扫描方法和真实雷达回波图像的比较, 表明该模型比传统方法具有更好的抗锯齿性能, 更能体现地表回波图像的雷达反射率细节和不同量程下的回波图像变化, 并且方便通过图像滤波处理模拟船舶运动过程中所产生的图像轻微模糊。

参考文献:

- [1] 王进成, 金一丞, 曹士连, 等. 使用三维场景绘制技术模拟雷达图像[J]. 大连海事大学学报, 2014(4): 79-84.
Wang Jincheng, Jin Yicheng, Cao Shilian, et al. Radar images simulation by using 3D scene rendering technology[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2014(4): 79-84.
- [2] 叶明君. 基于 GeoTIFF 的航海雷达图像的生成[J]. 上海海事大学学报, 2013, 34(1): 10-14.
Ye Mingjun. Marine radar image generation based on GeoTIFF[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2013, 34(1): 10-14.
- [3] 魏福伟. 基于 OGRE 的雷达建模及其分析方法设计与

- 实现[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- Wei Fuwei. Design and implementation of radar modeling and analysis method based on OGRE[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [4] 程欢. 基于 DEM 图像增强的航海雷达回波模拟[J]. 计算机工程与应用, 2018(10): 186-191.
- Cheng Huan. Method of marine radar echo simulation based on DEM image enhancement[J]. Computer Engineering and Applications, 2018(10): 186-191.
- [5] 曹士连, 金一丞, 尹勇, 等. 视景图形绘制方法生成航海雷达图像关键技术[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(5): 711-718.
- Cao Shilian, Jin Yicheng, Yin Yong, et al. Key technologies for generating marine radar image by scene rendering[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(5): 711-718.
- [6] 张亚臣, 周晓刚. ECDIS 模拟器中基于 SENC 的岛岸雷达回波生成算法[J]. 中国水运, 2015, 15(8): 92-95.
- Zhang Yachen, Zhou Xiaogang. Islands and Coast Radar Echo Generation Algorithm in ECDIS Simulator[J]. China Water Transport, 2015, 15(8): 92-95.
- [7] 丛琳, 任鸿翔, 刘彤, 等. 航海雷达模拟器中真实感雷达图像的仿真[J]. 中国航海, 2011, 34(4): 5-8.
- Cong Lin, Ren Hongxiang, Liu Tong, et al. Realistic Radar Image Simulation in Maritime Radar Simulator[J]. Navigation of China, 2011, 34(4): 5-8.
- [8] Gelautz M, Frick H, Raggam J, et al. SAR image simulation and analysis of alpine terrain[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (S0924-2716), 1998, 53(1): 17-38.
- [9] 魏丹婷, 塔西甫拉提·特依拜, 雷磊, 等. 不同入射角下的雷达后向散射系数图像模拟[J]. 遥感信息, 2012, 13(3): 54-59.
- Wei Danting, Tashpolat Tiyyip, Lei Lei, et al. Simulation of Radar Back scattering Coefficient Image at Different Incidence Angle[J]. Remote Sensing Information, 2012, 13(3): 54-59.
- [10] 余应福, 徐涛, 姜本清, 等. 基于 DEM 机载雷达图像仿真中地球曲率的影响[J]. 计算机仿真, 2014, 31(10): 6-10.
- Yu Yingfu, Xu Tao, Jiang Benqing, et al. Influence of earth curvature on airborne radar image simulation based on DEM[J]. Computer Simulation, 2014, 31(10): 6-10.
- [11] Long M W. 陆地和海洋的雷达反射特性[M]. 1 版. 陈春林, 译. 北京: 国防工业出版社, 1983: 215-216.
- Long M W. Radar Reflection Characteristics of Land and Sea[M]. 1st Edition. Chen Chunlin, translate. Beijing: National Defense Industry Press, 1983: 215-216.
- [12] 陈保辉. 雷达目标反射特性[M]. 1 版. 北京: 国防工业出版社, 1993: 96-100.
- Chen Baohui. Radar target reflection characteristics[M]. 1st Edition. Beijing: National Defense Industry Press, 1993: 96-100.
- [13] 尹良, 刘红杰, 赵晓峰, 等. 基于雷达方程的 AN/TPY-2 雷达作用距离与干扰研究[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(1): 50-57.
- Yin Liang, Liu Hongjie, Zhao Xiaofeng, et al. Research on AN/TPY-2 radar range and jamming based on radar equation[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(1): 50-57.
- [14] 马可, 李慧敏, 王仁涛, 等. 发射信号泄露的连续波雷达方程[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(6): 1295-1299.
- Ma Ke, Li Huimin, Wang Rentao, et al. Continuous wave radar equation for transmitting signal leaks[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(6): 1295-1299.
- [15] 李莹. 雷达系统多粒度建模与仿真[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- Li Ying. Multi granularity modeling and Simulation of radar system[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.