

The Research on Ship HRRP Radar Imaging Technology Based on Back Scattering Data

Weijie Ji, Xiaohongyi Han, Xiao Zhang, Yujie Wei

Air Force Xi'an Flight Academy, Xi'an Shaanxi
Email: jiweijie01@163.com

Received: Dec. 22nd, 2017; accepted: Jan. 5th, 2018; published: Jan. 12th, 2018

Abstract

In order to reflect the characteristics of ship's structure and shape by using radar High Resolution Range Profile (HRRP), the radar imaging technology based on back scattering data is researched in this paper. The three dimensional model of the vessel is established and parted based on triangular elements. The specular reflection and edges' diffraction of ship model are calculated by using the Physic Optic method (PO) and The Method of Equivalent Currents (MEC) respectively. According to the principle of spotlight imaging, the back scattering on different angles and frequency are calculated. The one-dimensional range profile and synthetic aperture radar imaging are obtained by data transformation. The influence of frequency, angle and polarization on detection of ship target is analyzed. The result shows that the SAR based on back scattering data can reflect the basic characteristics of the ship which is useful for ship recognition.

Keywords

Ship Target, Back Scattering, Radar Imaging, Target Recognition

基于后向散射场数据的舰船目标高分辨雷达成像技术

姬伟杰, 韩潇弘毅, 张 筱, 魏钰洁

空军西安飞行学院, 陕西 西安
Email: jiweijie01@163.com

收稿日期: 2017年12月22日; 录用日期: 2018年1月5日; 发布日期: 2018年1月12日

摘 要

为使高分辨雷达图像更精确反映舰船目标的结构、形状特点, 研究了基于后向散射场数据的舰船目标高

分辨雷达成像技术。建立了舰船目标三维模型,采用三角面元对模型进行剖分,利用物理光学法计算面元的镜面反射,应用等效电流法计算模型棱边部分绕射,依据机载雷达聚束式合成孔径(SAR)成像原理,得到舰船目标在不同姿态角和频率采样点的后向散射场。通过数据变换得到目标的一维距离像以及SAR图像,在此基础上研究了入射频率、方位角和极化方式对舰船目标探测的影响。仿真结果表明,该技术应用后向散射场数据得到的雷达SAR图像能反应出舰船的基本特征,可应用于舰船目标自动识别。

关键词

舰船目标, 后向散射场, 雷达成像, 目标识别

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

雷达是现代武器最重要的传感器,经过多年来不断发展,雷达获取信息的能力不断增长,但是在战场侦察、防空反导等武器雷达系统运用中,需要克服的一个难点是如何在更远距离上可靠检测和识别空中、地面及海上目标。为解决这一问题,新体制雷达不断出现,其中高分辨雷达系统由于在军事和民用领域的广泛应用而受到广泛关注,成为研究的热点[1]-[10]。国内外学者在舰船目标的高分辨雷达成像和自动识别技术方面做了大量工作,其中基于高分辨一维距离像与合成孔径雷达(SAR)图像的雷达目标特征提取及识别方法是研究的热点[11][12][13][14][15]。

当目标雷达散射处于光学散射区,雷达发射信号带宽很大时,复杂目标占据多个雷达距离分辨单元,其雷达回波称为一维距离像,若雷达在方位角旋转一定角度,就可以得到目标合成孔径雷达 SAR 成像。与普通雷达相比,宽带雷达探测精度更高,能够精细反应目标的尺寸结构、形状和散射点分布等信息,更有利于雷达进行自动目标识别。

以往大多数研究高分辨雷达成像技术通常采用强散射点建模,而在实际应用中,当雷达照射目标角度变化时,目标的强散射点会发生变化,因此采用散射点模拟目标散射会存在一定的误差,不能够真实反映雷达工作情况。本文采用三角面元构建复杂目标三维模型,利用高频近似算法计算目标的后向散射场数据,通过与 FEKO 软件计算结果进行比较,验证了算法的正确性,研究舰船目标的散射特性,并在此基础上得到舰船目标的 SAR 图像,以及不同角度雷达照射情况下目标的一维距离像。分析了频率、姿态角、极化方式等各项参数对高分辨雷达成像的影响。

2. 机载 SAR 场景及成像参数

机载聚束式 SAR 成像场景如图 1 所示。飞机飞行高度为 H , 距离目标的距离为 R , 飞行速度为 v , 其视线相对于目标坐标系俯仰角为 θ , 方位角为 φ 。

进行电磁散射建模,假设入射方位角和俯仰角均匀采样,采样点为 $\{(\theta_m, \varphi_m), m=1, 2, \dots, M\}$, 据预先确定的中心视角 (θ_c, φ_c) 、视角变化范围 $(\Delta\theta, \Delta\varphi)$ 。照射频率变化采用频率步进的方式均匀采样,采样点为 $\{f_n, n=1, 2, \dots, N\}$, 计算舰船目标的后向散射场数据用以模拟实际探测雷达回波,在此基础上利用适当的算法对其进行成像。根据设定的中心频率 f_c 和带宽 B , 以及的角度采样点 M 和频率采样点 N , 可以得到雷达成像场景条件参[3]:

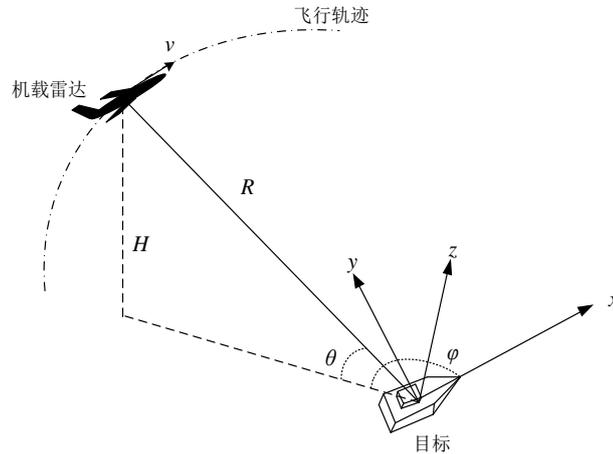


Figure 1. Airborne SAR imaging geometry

图 1. 机载 SAR 成像场景

$$\theta_m = \left(\theta_c - \frac{\Delta\theta}{2} \right) + m \cdot \frac{\Delta\theta}{M-1}, \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (1)$$

$$\varphi_m = \left(\varphi_c - \frac{\Delta\varphi}{2} \right) + m \cdot \frac{\Delta\varphi}{N-1}, \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2)$$

$$f_n = \left(f_c - \frac{B}{2} \right) + n \cdot \frac{B}{N-1}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

假设成像时间段内雷达视线转过了 δ 角度，并且在成像中心时刻，雷达处于正视状态，其方位角为 φ_c ，俯仰角为 θ_c ，与目标中心相距 R_0 ，可以得到：

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{H}{R_0}\right), \quad \varphi_c = 0 \quad (4)$$

入射角度的采样数 M 即为整个观测期间探测雷达发射的脉冲个数，它由雷达与目标之间距离 R 、入射角度变化范围 δ 、雷达脉冲重复时间(Pulse Repetition Time, PRT)和载机飞行速度 v 决定：

$$M = \frac{R\delta}{v \cdot PRT} \quad (5)$$

依据实际情况下探测目标最小不模糊距离来确定频率采样点个数 N 。

3. 舰船目标电磁散射计算

考虑工作波长为厘米级的机载雷达对舰船目标的探测性能。在该情况下，舰船目标为电大尺寸目标，此时目标散射处于光学区域，各散射单元之间的耦合作用很小，通常采用高频近似算法计算目标的电磁散射特性。

3.1. 目标剖分模型

首先建立舰船目标的三维模型，将其导入 Hypermesh 软件，依据平面波入射频率以及计算精度进行网格剖分，图 2 为利用三角面元对某型舰船目标进行剖分后的三维模型，该舰船长 100 m，宽 13 m，桅杆高度 20 m。

3.2. PO + MEC 算法计算目标散射

物理光学(PO)法的基本原理，当目标表面的曲率半径远远大于照射电磁波的波长时，假设在被入射

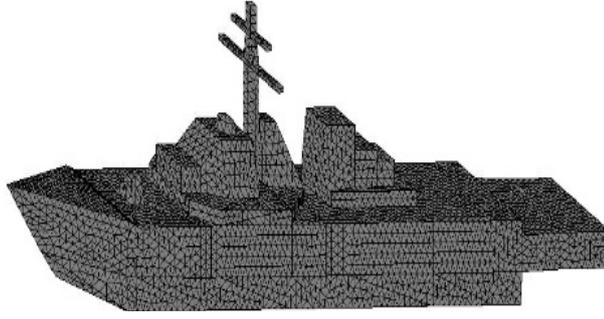


Figure 2. Ship subdivision model
图 2. 舰船剖分模型

波直接照明的区域存在表面电磁流。可以使用目标表面的等效感应电磁流的散射来代替散射体自身的散射，此时目标的散射场通过解析公式进行求解。考虑平面波入射，物体表面远区散射场可由根据 Stratton-Chu 方程[16]进行计算：

$$\mathbf{E}_s^{po}(\mathbf{r}) = \frac{jk}{4\pi r} \int_S \hat{\mathbf{s}} \times (\mathbf{M}_s(\mathbf{r}') + \eta_0 \hat{\mathbf{s}} \times \mathbf{J}_s(\mathbf{r}')) \cdot \exp[\mathbf{j}k\mathbf{r}' \cdot (\hat{\mathbf{s}} - \hat{\mathbf{i}})] d\mathbf{s}' \quad (6)$$

式中， $\hat{\mathbf{i}}$ 是入射方向单位矢量， $\hat{\mathbf{s}}$ 是散射方向的单位矢量， η_0 表示自由空间的波阻抗， S 表示目标表面被照射波照射部分。 $\mathbf{J}_s(\mathbf{r}')$ 和 $\mathbf{M}_s(\mathbf{r}')$ 表示 S 上的电磁流矢量幅度，其中的相位因子已包含在指数项中。 $\mathbf{J}_s(\mathbf{r}')$ 和 $\mathbf{M}_s(\mathbf{r}')$ 在两个基本物理光学假定的条件下，根据等效原理，

$$\mathbf{M}_s(\mathbf{r}') = \mathbf{E}(\mathbf{r}') \times \hat{\mathbf{n}}, \quad \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') = \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}(\mathbf{r}') \quad (7)$$

式中， $\mathbf{E}(\mathbf{r}')$ 是目标表面上总电场， $\mathbf{H}(\mathbf{r}')$ 是目标表面总磁场。此时，目标表面的总场是入射场和反射场的总和，即

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}') = \mathbf{E}_i(\mathbf{r}') + \mathbf{E}_r(\mathbf{r}') \quad (8)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}') = \mathbf{H}_i(\mathbf{r}') + \mathbf{H}_r(\mathbf{r}') \quad (9)$$

式中， $\mathbf{E}_i(\mathbf{r}')$, $\mathbf{H}_i(\mathbf{r}')$ 和 $\mathbf{E}_r(\mathbf{r}')$, $\mathbf{H}_r(\mathbf{r}')$ 分别为入射场反射场矢量。

通过考虑目标棱边的绕射对 PO 的结果进行改进。采用文献[17]中的等效电流法(MEC)计算目标棱边绕射，该方法应用等效电磁流的散射等效边缘绕射场。通过对等效电磁流进行积分来计算棱边在任意方向的散射场。对于边缘为 C 的劈边，其远区边缘绕射场可通过下式进行计算：

$$\mathbf{E}_s^d = \frac{jk}{4\pi r} \int_C \left\{ \eta_0 \hat{\mathbf{s}} \times [\hat{\mathbf{s}} \times \mathbf{J}(\mathbf{r}')] + \hat{\mathbf{s}} \times \mathbf{M}(\mathbf{r}') \right\} e^{j\mathbf{k}\hat{\mathbf{s}}\mathbf{r}'} d\mathbf{l} \quad (10)$$

式中， $\mathbf{J}(\mathbf{r}') = I_e(\mathbf{r}') \hat{\mathbf{t}}$ 表示边缘等效电流， $\mathbf{M}(\mathbf{r}') = I_m(\mathbf{r}') \hat{\mathbf{t}}$ 表示边缘等效磁流， $\hat{\mathbf{t}}$ 表示劈边 C 的切向单位矢量。 I_e 与 I_m 的定义见文献[17]。

目标总的散射场为 PO 法计算的镜面散射以及 MEC 法计算的棱边绕射之和，即

$$\mathbf{E}^{total} = \mathbf{E}_s^{po} + \mathbf{E}_s^d \quad (11)$$

用宽带信号照射舰船目标，利用 PO + MEC 算法计算舰船目标在不同频段、不同姿态角下的后向散射场数据，流程如图 3 所示。

例如，对某一舰船目标在 n 个姿态角进行照射，得到的散射场数据为：

$$\mathbf{Y} = [\mathbf{Y}(1), \mathbf{Y}(2), \dots, \mathbf{Y}(n)] \quad (12)$$

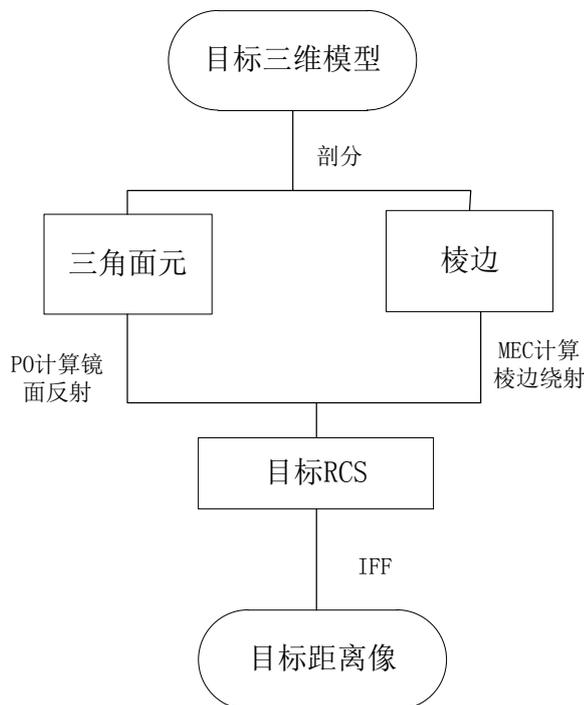


Figure 3. The flow diagram of PO + MEC algorithm
图 3. PO + MEC 算法流程图

每一列数据对应一个姿态角下不同频率采样，每一行数据对应一个频率下不同姿态角采样。对数据做二维傅里叶变换(FFT)可以得到目标的 SAR 成像，对每一列直接做逆傅里叶变换(IFFT)即可得到目标高分辨距离像。

4. 仿真计算

采用第二节中的三维舰船模型，舰船放置于 xoy 平面，中心位于坐标原点，舰首对应 x 轴向正方向，舰船轴线垂直于 y 轴(见图 4)，剖分精度为 $\lambda/6$ ，总共 18225 个顶点，36,446 个三角面元，54,701 个公用棱边。

设照射频率为 2 GHz，应用纯 PO 算法以及 PO + MEC 算法计算边长为 0.5 m 的立方体后向散射，得到水平极化(HH)雷达散射截面(RCS)如图 5 所示，图中给出了应用 FEKO 软件计算的结果。计算结果表明，两种方法的计算结果吻合的较好，验证了 PO + MEC 算法的正确性。由图可知，通过加入计算棱边绕射，MEC 很好地改善了 PO 的计算结果。

图 6 所示为应用本文算法计算舰船模型的后向散射，方位角 $\varphi = 0^\circ$ ，俯仰角 θ 变化范围 $0^\circ \sim 180^\circ$ ，雷达照射频率 2 GHz，图 6(a)为 HH 极化结果，图 6(b)为 VV 极化结果。计算数据表明，舰船散射在 0° (舰首)、 90° (舰船正上方)以及 180° (舰尾)方向最大，VV 极化情况下 RCS 略小于 HH 极化结果，尤其是 $30^\circ \sim 70^\circ$ 范围内 HH 极化结果明显较大。

取俯仰角 θ 分别为 30° 和 60° ，方位角 φ 变化范围 $0^\circ \sim 360^\circ$ ，相当于雷达绕舰船一周，其余参数不变，得到的散射结果如图 7 所示，其中图 7(a)为 HH 极化结果，图 7(b)为 VV 极化结果。由图可知，舰船 RCS 在舰首(0°)、舰尾(180°)、船舷(90° 和 270°)等方向最强，且随着俯仰角增大而增大，同图 5 中结果类似，HH 极化散射强于 VV 极化结果，这是由于 HH 极化二向性散射强于 VV 极化，因此 HH 极化更能反映舰船的上层建筑结构，导致 HH 极化散射强于 HH 极化。因此，应用 HH 极化雷达探测舰船目标更具有优势。

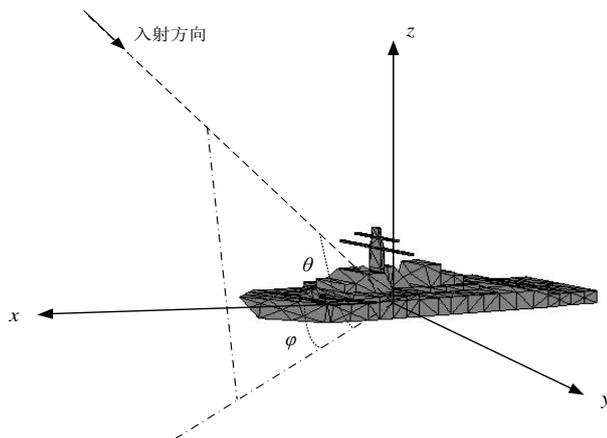


Figure 4. Electromagnetic scattering geometry
图 4. 电磁散射场景

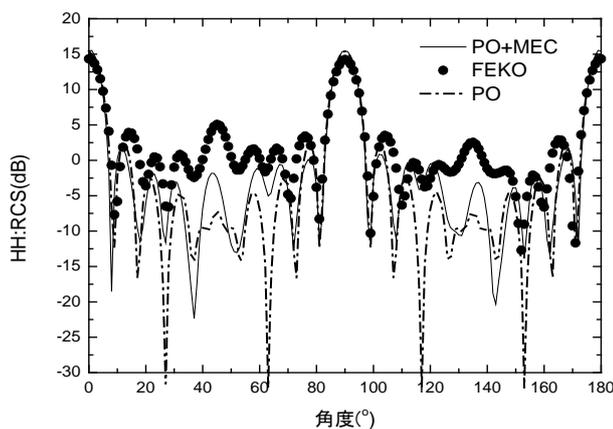


Figure 5. Algorithm validation
图 5. 算法验证

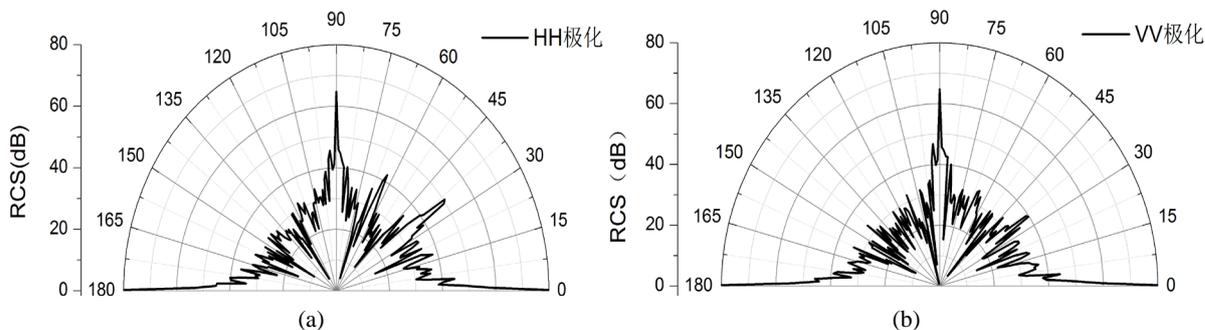


Figure 6. RCS of ship with different incidence angle; (a) HH polarization; (b) VV polarization
图 6. 不同俯仰角舰船目标 RCS; (a) HH 极化; (b) VV 极化

考虑典型 L 波段机载搜索雷达, 照射频率为 $f_c = 2.0$ GHz, 带宽为 $B = 150$ MHz, 频率范围: 1.925 GHz~2.075 GHz, 采样间隔 $\Delta f = 1$ MHz, 共 $N = 150$ 个采样点, 此时距离分辨率为 $\rho_r = C/2B = 1.0$ m, 假设雷达载机飞行高度距离地面高度 9 km, 目标距离 200 Km, 此时俯仰角 $\theta = 2.6^\circ$ 。在 HH 极化情况下, 计算后向散射场数据, 进行 IFFT 变换并对幅值归一化的到舰船目标的一维距离像如图 8 所示, 图 8(a) 为方位角 $\varphi = 0^\circ$ 的结果, 此时雷达从舰首入射, 有图可以看出, 舰船在雷达视线的径向长度为 100 m 左

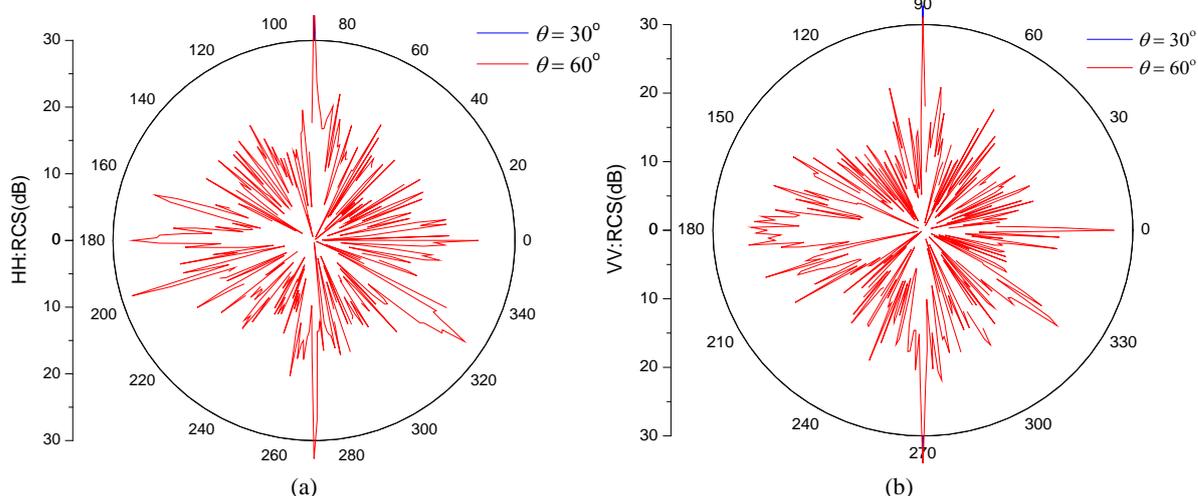


Figure 7. RCS of ship with different azimuth angle; (a) HH polarization; (b) VV polarization

图 7. 不同方位角舰船目标 RCS; (a) HH 极化; (b) VV 极化

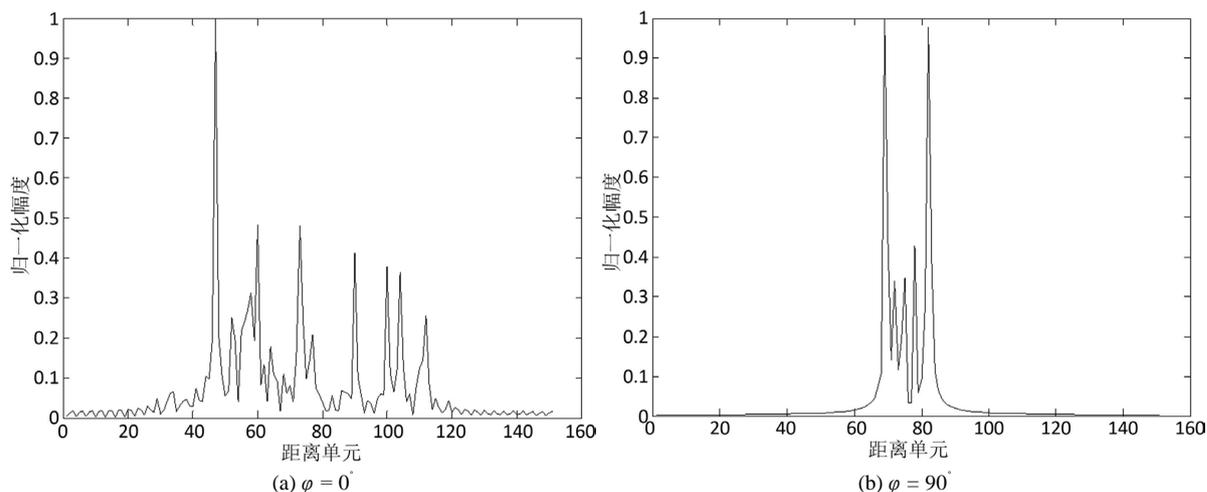


Figure 8. Ship HRRP of different azimuth angle

图 8. 不同方位角舰船目标一维距离像

右, 主要反射部位集中于船身 20~90 m 区域, 这正是舰船上层建筑最为集中的区域。图 8(b)为方位角 $\varphi = 90^\circ$ 的结果, 相当于雷达从船舷部照射, 此时雷达径向距离径向长度为 14 m 左右, 对应的是舰船目标的船体宽度。因此, 通过不同姿态角舰船高分辨一维距离像可以得到舰船长度、舰身宽度、舰桥上层建筑尺寸和数量等船体结构信息, 这些信息均可应用于后续进行雷达自动目标。

其余参数不变, HH 极化情况下, 取方位角变化范围 10° , 采样间隔为 0.05° , 采样数 $M = 201$ 个, 得到 150 行和 201 列大小的矩阵数据, 对其进行 FFT 变换, 即可得到舰船目标 SAR 成像, 见图 9, 其中图 9(a)为直接 FFT 变换结果, 图 9(b)为加窗 FFT 变换, 窗函数为布莱克曼窗, 经过对比可知窗函数能够很好的改善成像结果。从图像中可以分辨出舰船的尺寸与图 7 中相同, 同时可以发现舰船强散射点集中于甲板上建筑反射。由于不同舰船目标的长度、宽度和长宽比都是独特的, 因此经过提取这些特征参数, 可以很好的应用于雷达自动目标识别。图 9(c)为舰船旋转 45° 的 SAR 图像, 与图 9(b)相比, 此时的舰船目标强散射点增加, 这是由于船舷部分的散射较强造成的。同时该结果证明了本文算法对不同姿态目标能得到很好的结果, 具有很好的适应性。

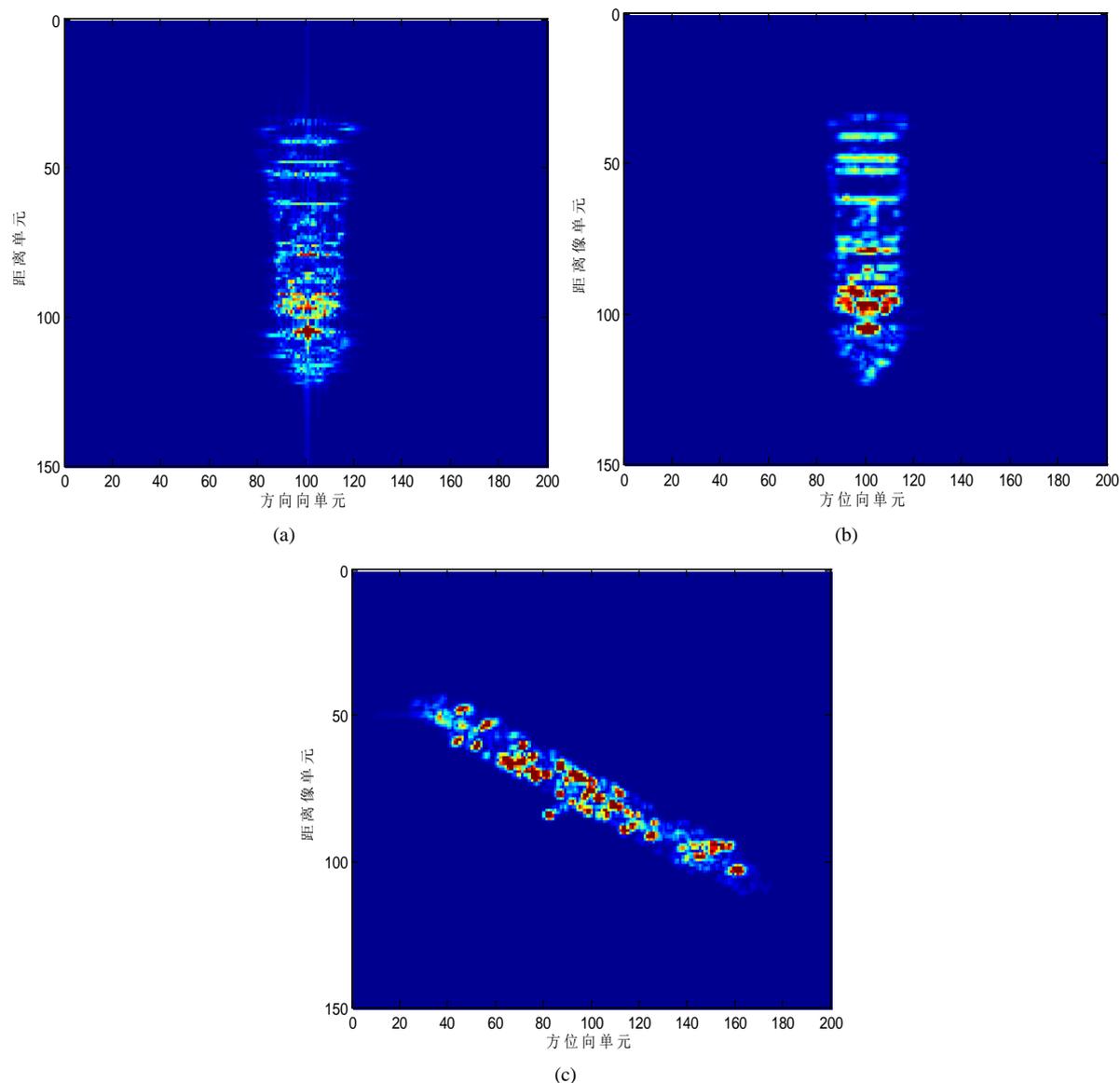


Figure 9. SAR of ship; (a) SAR without window function; (b) SAR with window function; (c) SAR of rotating 45 degree
图 9. 舰船目标 SAR 图像; (a) 不加窗图像; (b) 加窗图像; (c) 旋转 45° 成像

5. 结论

本文在建立舰船目标三维模型的基础上, 研究了舰船目标 L 波段探测雷达照射下不同姿态角和极化方式下的电磁散射特性。结果表明, 舰船目标的散射主要集中于舰首、舰尾及船舷侧, 并且 HH 极化反射要强于 VV 极化。根据 SAR 成像原理, 计算了不同方位角和频率采样点的后向散射数据, 通过数据变换得到目标的一维距离像和 SAR 图像。计算结果表明, 舰船目标高分辨雷达图像能够较好的反应舰船的尺寸、形状和强散射点数量, 这些特征在雷达自动目标识别中具有重要应用, 同时该结果也证明了文中三维模型及高频近似算法的准确性。研究结果对提高雷达舰船目标探测与识别具有一定的参考意义。

基金项目

国家自然科学基金(61372033)。

参考文献 (References)

- [1] Xing, M.D., Bao, Z. and Pei, B.N. (2002) The Properties of High Resolution Range Profiles. *Optical Engineering*, **41**, 493-504. <https://doi.org/10.1117/1.1431251>
- [2] Duan, J., Zhang, L. and Xing, M.D. (2014) Polarimetric Target Decomposition Based on Attributed Scattering Center Model for Synthetic Aperture Radar Targets. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **11**, 2095-2099. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2320053>
- [3] 李浩林, 陈露露, 张磊, 等. 一种适用于快速分解后向投影聚束 SAR 成像的自聚焦方法[J]. 航空学报, 2014, 35(7): 2011-2018.
- [4] Du, L., Liu, H.W., Bao, Z. and Xing, M.D. (2005) Radar HRRP Target Recognition Based on Higher Order Spectra. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **53**, 2359-2368.
- [5] 付强, 周剑雄. 雷达目标散射中心模型反演及其在识别中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(1): 48-52.
- [6] 段崇雯, 胡卫东, 杜小勇. 海面目标雷达回波中多径延迟的概率模型[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(6): 1140-1145.
- [7] 张瑞, 牛威, 寇鹏. 基于样本高密度的雷达高分辨距离识别方法研究[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(3): 529-536.
- [8] 郭尊华, 李达, 张伯彦. 雷达高距离分辨率一维像目标识别[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(1): 53-60.
- [9] 喻洋, 皮亦鸣. 太赫兹雷达目标 HRRP 特性分析[J]. 信号处理, 2016, 32(6): 631-634.
- [10] Zhang, H.H. and Chen, R.S. (2013) Radar Target Recognition Based on Multi-Directional E-Pulse Technique. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **61**, 5838-5843.
- [11] Du, L., Liu, H.W. and Bao, Z. (2005) Radar HRRP Target Recognition Based on Higher-Order Spectra. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **53**, 2359-2368.
- [12] 张伟, 莫翠琼, 陈秋菊, 等. 舰船目标雷达高分辨距离像的建模与仿真[J]. 电光与控制, 2016, 23(2): 47-50.
- [13] Margarit, G. and Tabasco, A. (2011) Ship Classification in Single-Pol SAR Images Based on Fuzzy Logic. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1-10.
- [14] 陈建宏, 刘伟, 赵拥军. 高分辨率 SAR 图像舰船目标匹配技术研究[J]. 信息工程大学学报, 2016, 17(3): 292-297.
- [15] 翟亮, 李禹, 栗毅. 基于异常检测与双层筛选机制的 SAR 图像舰船检测方法[J]. 计算机工程, 2017, 43(4): 244-250.
- [16] Gordon, W.B. (1994) High Frequency Approximations to the Physical Optics Scattering Integral. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **42**, 427-432.
- [17] Michaeli, A. (1984) Equivalent Edge Currents for Arbitrary Aspects of Observation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **32**, 252-258. <https://doi.org/10.1109/TAP.1984.1143303>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: app@hanspub.org