

# 舰船目标逆合成孔径雷达成像分析

朱子健<sup>1</sup>, 徐 有<sup>2</sup>, 马志强<sup>1</sup>, 刘玲霞<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 空军工程大学 训练部, 陕西 西安 710051)

**摘 要:**对海上非平稳的舰船目标实现瞬时 ISAR 2 维成像。利用多普勒效应, 得到目标的 1 维距离像, 将各次回波包络对齐, 在方位上进行自聚焦, 即将目标等效为转台模型。在转台模型下, 目标的运动分为平动和转动分量, 平动分量在雷达成像过程中没有任何作用, 因此需要将其补偿掉, 这是雷达成像关键技术所在。对于运动比较平稳的观测目标, 经过包络对齐和自聚焦后就可以直接得到其 2 维图像, 但由于舰船目标通常是非合作目标, 其目标特性和运动轨迹等很难确定, 其回波具有明显的时变性, 因此, 按照多普勒中心的周期把成像时间划分为若干个时间段, 针对不同的成像时间段得到相应时刻的瞬时 ISAR 像, 由 Matlab 仿真对得出的分析结果进行了检验, 表明该方法对于非平稳的舰船目标成像是有效的。

**关键词:** ISAR; 转台模型; 运动补偿; 瞬时 2 维像

**DOI:** 10.3969/j.issn.1009-3516.2009.03.010

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)03-0047-03

逆合成孔径雷达 (ISAR) 是在合成孔径雷达技术的基础上发展起来的。雷达静止, 目标运动的成像系统称为 ISAR 成像系统。20 世纪 80 年代 C. C. Chen 和 Andrew 首先获得了真实飞机的 ISAR 图像<sup>[1]</sup>。随后, ISAR 技术开始向实用阶段发展。通过 ISAR 成像作为目标识别已在现代雷达中应用, 现在国外对战场感知<sup>[2]</sup>要求高的雷达均配有 2 维成像功能。

运动目标的 ISAR 成像主要通过运动补偿和成像处理来完成。运动目标经过平动补偿后, 等效为转台目标<sup>[3]</sup>。一般 ISAR 成像所需的转角很小, 仅  $2^{\circ} - 3^{\circ}$ , 这期间, 散射点的相对位置、强度都不发生变化, 因此成像期间越距离单元走动可以忽略不计, 从而使问题大大简化。对于运动比较平稳的目标, 经过包络对齐<sup>[4]</sup>和初相校正<sup>[4]</sup>后, 利用成像处理, 如直角坐标距离-多普勒成像 (R-D 方法)<sup>[5]</sup>, 极坐标距离-多普勒成像<sup>[6]</sup>, 滤波-反投影法<sup>[7-8]</sup>等就可以得到目标的 2 维图像。但是对于舰船目标等非平稳运动的目标, 回波经过包络对齐、自聚焦后, 各个距离单元的信号为该距离单元上各散射点子回波和噪声及杂波的矢量和, 故可利用时频分析, 找到各个频率分量并进行处理。

## 1 时频分析

要对复杂时变的信号作高分辨的时频分析是有困难的, 但对于惰性比较大的目标, 姿态和转速的变化不会是突然的, 即回波信号各个分量的时频变化不会十分复杂。大多数情况下, 对于线性调频信号, 在成像所需的转角范围里, 回波各分量的相位历程可以用 2 次和 2 次以下的多项式近似, 3 次以上的相位项可以忽略。也就是说, 回波中各个散射点子回波分量可以用不同斜率的线性调频波表示。

对线性调频一类信号, 用 Wigner-Ville 分布<sup>[4]</sup>作时频分析, 其分辨率是最高的。Wigner-Ville 分布 (WVD) 是常用的 2 次型 (功率) 时频分布。一个平稳随机信号  $s(t)$ , 它的相关函数是  $R(\tau) = E$

\* 收稿日期: 2008-03-23

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目 (2007F01)

作者简介: 朱子健 (1979-), 男, 重庆江津人, 讲师, 主要从事检测技术与自动化装置及信号处理研究。

E-mail: zhuzijian0304@163.com

$\left[ s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \right]$ , 其中  $E[\cdot]$  为统计平均。

若信号具有遍历性, 统计平均可用时间平均代替。相关函数的傅里叶变换为功率谱。

信号的功率谱同样不具有局域性, 为了得到功率谱随时间的变化, 可借用短时傅里叶变换的做法, 采用短时的相关函数。Wigner - Ville 分布 (WVD) 则采用了相关函数的瞬时值  $R(t, \tau) = s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right)$ , 则信号  $s(t)$  的 WVD 为:

$$\text{WVD}_s(t, f) = \int R(t, \tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = \int s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

WVD 作为一种 2 次型的时频分布, 具有许多优良的特性。WVD 特别适用于线性调频 (LFM) 信号作时频分析, 若信号为  $s(t) = e^{-j2\pi(f_0 t + \frac{1}{2}\gamma t^2)}$ , 则:

$$\text{WVD}_{\text{LFM}}(t, f) = \int R(t, \tau) e^{j2\pi(f_0 + \gamma t)\tau} e^{-j2\pi f\tau} d\tau = \delta[f - (f_0 + \gamma t)] \quad (2)$$

式(2)表明 LFM 信号的 WVD 为冲击线性谱, 且各个时刻的频率值与 LFM 信号的瞬时频率相同, 这显然是所期望的。

目标经过包络对齐、自聚焦后, 各个距离单元的信号为该距离单元上各个散射点子和噪声及杂波的矢量和, 由于海水波动等原因, 使舰船的 3 维运动比较明显, 各散射点子回波为调频信号, 一定程度上, 可以近似为线性调频信号, 或者近似为分段的线性调频信号<sup>[9]</sup>。这样各距离单元的信号为噪声和杂波背景下的多分量线性调频信号。基于多分量的 LFM 信号参数估计的瞬时成像方法有“clean”算法<sup>[10]</sup>, 得到各个分量的瞬时多普勒, 并将其补偿。

由于受到非线性策动力和非线性阻尼力的作用, 各维变化都呈现出多倍周期和随机性的特点; 同时, 舰船目标的转动速度比较慢, 为获得所需孔径就要求有较长时间的积累, 长时间里会产生较大的高阶相位项, 基于上述问题, 本文提出了一种基于多普勒中心估计的选择合适成像时间段的方法。

## 2 基于多普勒中心估计的成像时间段的选取

在进行包络对齐后, 进行多普勒中心估计, 一般采用相关函数法估计多普勒中心。首先估计出各个距离单元的瞬时多普勒中心, 再把所有距离单元进行平均得到在此瞬间的多普勒中心。一般来讲, 单个距离单元的多普勒中心随机性大、较散乱, 而目标像的平均多普勒中心较平滑, 有宏观意义。所以, 在成像时间段的选取上, 采用目标的平均多普勒中心。由于舰船受非线性策动力和非线性阻尼力的作用, 各维度上的摆动都呈现出多倍周期和随机性的特点, 其多普勒中心也呈现随慢时间作不规则的周期变化, 前面提到, 此时信号可看作是分段的线性调频信号, 或者是线性调频信号。根据多普勒中心这个特点, 成像的时间段分别选在多普勒中心线性变化区域。

图 1 给出了多普勒中心频率随慢时间变化图, 由图中可以看出, 成像时间段可以选在 5 个区域, 在每个时间段, 多普勒中心频率的变化都保持线性变化, 因此都可以进行瞬时多普勒成像。

## 3 仿真数据成像结果

仿真数据其主要参数为: 发射信号为线性调频信号, 经过 Dechirp 前带宽 110 MHz, Dechirp 之后为 30 MHz, 信号脉宽为 25.6  $\mu\text{s}$ , 重复频率为 3 000 Hz。

对整段数进行包络对齐和自聚焦后, 估计其多普勒中心, 得到多普勒中心变化曲线见图 2。

由距离分辨率公式:

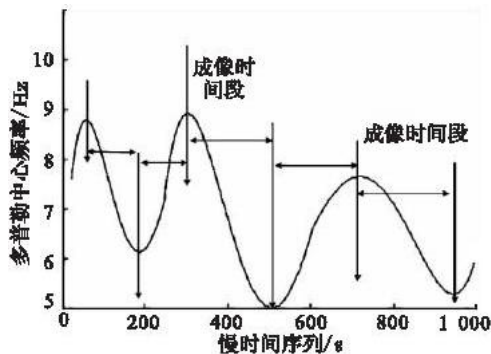


图 1 成像时间段和成像时刻的选取

Fig. 1 Selection of imaging time section and imaging moment

$$\rho_r = C/2B \quad (3)$$

得到距离分辨率为 1.36 m。对成像时间段 2 进行成像分析,成像结果见图 3。

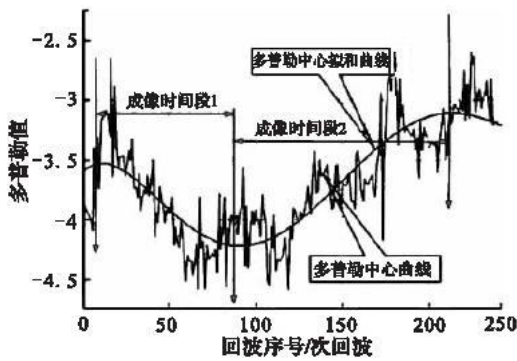


图2 某段数据的多普勒中心变化曲线

Fig.2 Doppler center changing curve of the data

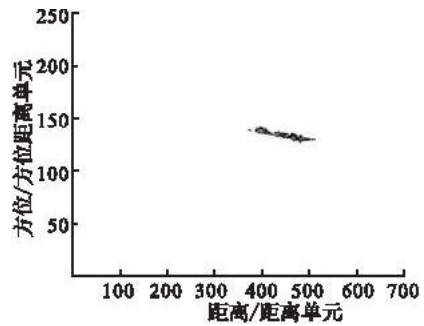


图3 成像结果

Fig.3 Imaging result

在这组数据里,我们看到,在方位上,舰船约占 20 个距离单元,能够看出船的大体形状,由于转动的角度很小,多普勒变化不大,所以只能看到舰船的外形,不能分辨出船头和船尾。

## 4 结束语

对于目标运动比较平稳的情况下,我们可以直接采用距离多普勒算法。但是通常情况下,舰船目标不但在偏航、横贯、俯仰 3 个维度同时存在姿态变化,而且,由于受非线性策动力和非线性阻尼力的作用,各维度上的摆动都呈现出多倍周期和随机性的特点,其回波具有明显的时变性。针对这种情况,提出了成像时间段的选取问题,在多普勒中心频率估计的基础上,把整个慢时间段划分成若干个时间段,在每段时间内回波信号近似是线性调频信号。对每段时间段内的回波数据进行瞬时成像,得到各段数据的瞬时多普勒成像。通过仿真数据进行 ISAR 成像分析,最终得到了较好的成像结果,验证了分析的有效性。

## 参考文献:

- [ 1 ] Chen C C, Anfrews H C. Target - Induced Radar Imaging [J]. IEEE Trans on AES,1980,16(1): 2 - 14.
- [ 2 ] Femell M T,Wishner R P. Battlefield Awareness via Synergistic SAR and MTI Exploritation [J]. IEEE AES Magazine, 1998, (2):39 - 41.
- [ 3 ] 张贤达,保 铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京:国防工业出版社,1998:153 - 186.  
ZHANG Xianda, BAO Zheng. Non - steady Signal Analysis and Processing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998:153 - 186. (in Chinese)
- [ 4 ] 保 铮,刑孟道,王 彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005.  
BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. Radar Imaging Technology [M]. Beijing:Electronic Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [ 5 ] Ausherman D A,Kozma A,Walker J L,et al. Developments in Radar Imaging [J]. IEEE Trans on AES,1969,5(1):98 - 102.
- [ 6 ] Walker J L. Range - Doppler Imaging of Rotating Objects [J]. IEEE Trans on AES, 1980, 16(1):23 - 52.
- [ 7 ] Mensa D L,Halevy S,Wade G. Coherent Doppler Tomography for Microwave Imaging [J]. Proc IEEE, 1983, 71(2):251 - 261.
- [ 8 ] Muson D C. A Tomographic Formulation of Spotlight - mode Synthetic Aperture Radar [J]. Proc IEEE, 1983, 71(8):917 - 925.
- [ 9 ] 邢孟道,保 铮. 外场实测数据的舰船目标成像方法[J]. 电子与信息学报,2006,28(1):1 - 6.  
XING Mengdao,BAO Zheng. Ship Target Imaging Method of Outfield Measured Data [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2006, 28(1):1 - 6. (in Chinese)
- [ 10 ] 伍 捷,时频方法在高分辨率 ISAR 运动补偿和成像中的应用[D]. 西安:西安电子科技大学,2006.  
WU Jie. Time - frequency Methods'Application in High Resolution ISAR Motion Compensation and Imaging [D]. Xi'an: Xidi-an University, 2006. (in Chinese)

(编辑:田新华)

(下转第 90 页)