

## 基于 SAR 实测数据的舰船成像研究

汪 玲 朱岱寅 朱兆达

(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)

**摘要:** 该文基于机载 SAR 实测数据,对舰船目标成像进行了研究。SAR 成像是针对静止目标,舰船目标表现在 SAR 图像上是散焦的。基于舰船目标的非合作性,可采用 ISAR 的方法对其进行成像处理,以得到高分辨的舰船图像。该文介绍了如何从 SAR 实测数据中提取出舰船目标的回波数据,并讨论了对舰船成像比较有效的 ISAR 运动补偿方法。最后给出了多艘典型舰船的清晰成像结果。该文提供了机载雷达 SAR 模式工作时对舰船成像的有效处理方法。

**关键词:** 合成孔径雷达(SAR); 机载雷达; 舰船目标识别

**中图分类号:** TN959.72

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2007)02-0401-04

## Study on Ship Imaging Using SAR Real Data

Wang Ling Zhu Dai-yin Zhu Zhao-da

(College of Info. Sci. and Tech., Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Ship ISAR imaging is studied in the paper based on the airborne SAR real data. SAR imaging deals with static targets. A moving ship appears blurred in the SAR image. For the purpose of getting high resolution ship images, ISAR imagery may be introduced into the imaging due to the non-cooperative character of the ship target. In the paper, the extraction of ship data from SAR real data is described firstly. Then, effective ISAR motion compensation methods appropriate to ship imaging are discussed. Finally, clear images of several typical ships are presented. This work provides effective processing methods for ship imaging when the airborne radar works in SAR mode.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar(SAR); Airborne radar; Ship target recognition

### 1 引言

海上船只的检测、成像和识别是机载雷达研究中的一项重要课题,在军事和民用中都具有重要应用前景。通常舰船处于复杂的海面背景下,而且雷达载机沿着某一轨道飞行,这两者增加了舰船成像的复杂度。国外研究机构集中了较大的精力,致力于得到高分辨率的舰船图像<sup>[1-3]</sup>。

机载雷达对舰船成像依靠舰船与雷达视线之间的相对转动,它由飞机与舰船航行引起的相对转动,和舰船自身摇摆产生的转动组成。与之相应,舰船成像有两种方式,飞机运动成像和舰船摇摆成像。前者与机舰相对速度、方位和距离有关,而后者与海情、舰型、舰速和航向有关。因此,机载雷达对舰船的成像是一种 SAR/ISAR 混合成像。

文献[3]曾给出 AN/APG-76 雷达得到的分辨率为 1m 和 3m 的舰船图像,但只是简要介绍,没有给出处理过程。本文基于机载 SAR 实测数据,对舰船目标的成像进行研究,提供了机载雷达 SAR 模式工作时对舰船成像的有效处理方法。由于 SAR 成像是针对静止目标,舰船等动目标表现在 SAR 图像上是散焦的。为了得到舰船的高分辨率图像,基

于舰船动目标的非合作性,可以借助 ISAR 的方法。本文第 2 节介绍如何从 SAR 实测数据中提取出舰船目标的原始回波数据,第 3 节讨论应用于舰船成像较有效的 ISAR 运动补偿方法,第 4 节是最后的舰船成像结果,并同时给出舰船的 SAR 图像以供比较。第 5 节是结束语。

### 2 舰船数据提取

提取 SAR 数据中的舰船目标时,可以依靠 SAR 成像技术。虽然 SAR 成像旨在得到静止目标的精细图像,动目标表现在 SAR 图像上是散焦和模糊的,但是动目标的信杂比得以提高,尤其是位于海面上的舰船,其所处背景单一,相比地面动目标不易被杂波遮掩,能够比较容易从海面背景中被提取出来。

提取的基本思想是:从 SAR 图像中大致判断出舰船所在的方位和距离,根据舰船与雷达之间的距离,计算相应的合成孔径长度,大致确定包含舰船数据的脉冲数目,从舰船所在的距离单元中只提取包含舰船数据的相应脉冲作后期处理。本文采用 Chirp Scaling(CS)成像算法得到 SAR 图像,然后完成舰船目标数据的提取。

提取舰船回波数据时,需要保证数据与被提取目标之间

的对应关系,并且在提取目标数据的同时,屏蔽其它目标的干扰。所以必须注意以下几个方面:第一,SAR成像是为了检测舰船目标,确定目标所在区域,但是由于成像算法和预滤波,在图像中目标所处的距离和方位与目标回波在原始数据中的位置是有区别的。因此在提取数据时只能从SAR图像中判断出舰船目标所处的回波范围,然后对此回波范围相应的原始数据进行以下处理:在不引入预滤波的情况下,完成距离向压缩,得到一维距离像图。然后根据SAR图像中舰船与其它景物的相对位置关系,与一维距离像图中的舰船目标的距离像对应,从而将舰船数据提取出来。第二,由已知成像参数计算得出的包含舰船数据的回波个数只是大致的估算,与实际提取过程中检测到的和可提取的舰船回波数目是有差别的。天线副瓣的影响会增加舰船目标的回波数,其它目标和地杂波的影响会减少可提取的舰船目标的回波数(详见下面的论述)。为了得到舰船的高分辨率图像,需要提取信号强和相关性强的目标回波。第三,在海面上会散布许多舰船。当相距较近时,要确保单个舰船的数据与其它舰船数据分开。两个舰船目标在距离向上的分离较容易做到,如果在同一距离上的舰船在方位向上相距较近,则关于它们的回波数据会部分混合在一起。由于舰船各自相对于雷达的速度不一样,它们的一维距离像将形成不同的距离徙动轨迹。对这样包含两个目标的数据进行ISAR的运动补偿,即距离对准和相位补偿,最后显然得不到它们各自清晰的图像。所以必须保证提取的回波数据只包含一个目标,然后进行ISAR的成像处理。可以从一维距离像图上根据徙动轨迹的不同,分辨出两舰船目标参杂在一起的回波范围,尽量提取此范围之外的关于目标的有效回波。若在时域较难从同时包含多个目标的回波数据中分离出单个目标的回波数据,可以借助时频分析。一般目标的运动规律各异,在时频域它们所呈现的方式不同,通过时频变换和掩膜(滤波)处理,在时频域可以将单个目标分离出来。此外,针对多个目标的混合数据,还可以用最大似然方法估计出每个目标的运动参数,然后利用目标运动参数的估计值依次对每个目标进行运动补偿和成像。如果要成像的目标获得了较好的运动补偿,那么回波中其它目标产生的信号分量完全可以看成噪声。通过成像时间内的大量回波的积累,可以得到当前成像目标的聚焦图像<sup>[4]</sup>。本文中处理的数据,至多两个舰船目标的回波数据参杂在一起,而且混合的回波范围有限,能够根据各自距离像徙动轨迹的不同,完成单个目标有效回波数据的提取。第三,当舰船距岸边较近时,会受到强地杂波的干扰,舰船的部分回波数据的信杂比降低,而且与舰船其它回波不具有较好的相关性。因此,提取数据时要尽可能提取不受地杂波干扰的回波,以保证得到高质量的舰船ISAR图像。

实测机载 SAR 数据的主要参数:Ku 波段,发射 LFM 信号带宽为 180MHz,脉冲重复频率 PRF 为 1000Hz。

### 3 运动补偿

在成像之前要完成对舰船目标回波数据的运动补偿,消除回波的距离徙动和补偿因距离一维像偏移引起的附加多普勒相位。

#### 3.1 距离对准

从 SAR 数据中提取出若干艘舰船的回波数据,经过观察发现,舰船目标回波的距离向走动比较缓慢,整体回波的距离向漂移十分平缓,没有剧烈的波动。针对具有此特性的数据,用常规的相邻距离像包络相关法对准各距离像,得到的结果与未处理前没有很大差别。采用相邻包络最小熵法,仍未得到满意的结果。其主要原因是舰船目标运动缓慢,而且机载雷达基本正侧视工作(斜视角很小),相邻回波的距离走动很小,上述方法估计距离像的偏移量,由于精度限制和误差积累,所以失效。这里需要说明,虽然海面杂波的存在,会使得舰船回波信噪比较低,但是提取出的相邻回波的相关系数大部分都在 0.95 以上,因此海面杂波不是导致上述距离对准法失效的主导原因。

针对舰船回波数据,将成像时间内的回波都和第一个回波进行相关对准是一种实时性高而且有效的方法。这种方法抑制了漂移误差(即误差积累),可以基本完成目标回波的距离对准,但前提是后续回波与第一个回波要具有较好的相关性,否则方位向仍然无法很好聚焦。对提取出的若干艘舰船,在保证其回波数据良好(信号强和相邻相关性好)的条件下,采用上述方法处理,基本都可以得到满意的对准结果和较好的成像结果。少数几艘舰船,由于回波变化较快,后续回波与第一个回波之间的相关性较差,最后得不到聚焦较好的图像。

半边窗的相关对准方法同样可以校正平缓的回波偏移。所谓半边窗,是把所有已对准回波的合成作为当前回波的对准基准,窗的形状可以是矩形窗或指数窗等<sup>[5]</sup>。半边窗的相关对准方法提高了当前待对准回波与基准回波之间的相关性,处理后的对准效果优于与第一个回波对准的方法。采用这种方法对提取出的舰船回波进行距离对准,得到了更清晰的成像结果,而且对舰船数据具有较广泛的适用性。

此外,基于Radon变换的距离对准方法也可以有效解决平稳走动回波的对准问题<sup>[6]</sup>。传统的距离对准法都是基于回波的强相关性,依次调整回波的距离偏移。为了提高精度,一般需要对回波数据内插,而且需要通过平均减弱误差积累造成的漂移误差和消除因为回波突变造成的突跳误差。前述常规的基于相邻回波的距离对准方法针对舰船数据的失效,正是漂移误差所致。要解决慢漂移误差,必须积累足够多的回波作为对准基准,否则效果不明显。对于舰船的回波数据,需要用半边窗的距离对准,即把所有已对准的回波进行平均,才能得到对准的距离像。Radon变换<sup>[7]</sup>从整体角度探测距离像的偏移,可以完全克服漂移误差和突跳误差,而且不

需要对回波进行内插。舰船是一种慢速运动目标,其距离像走动通常比较平缓,采用 Radon 变换显然是一种有效的措施。在较短的时间内,舰船目标距离走动可以很好地近似成直线,可以采用整体 Radon 变换。在成像时间较长时,用分段 Radon 变换可以达到满意、可靠的对准效果。对待处理的回波进行分段直线近似,然后用 Radon 变换估计每段距离走动斜率,再内插得到每次回波距离走动的瞬时斜率,最后通过积分获得回波距离走动曲线,完成距离对准。

对实测舰船数据的处理表明,当目标回波在其所占据的距离单元上无特别突出的强散射点时,用半边窗的距离对准方法得不到很好的成像结果,这时采用 Radon 变换可以获得较好的舰船图像。而当目标回波在某些距离单元上存在强散射点时,半边窗对准方法的精度较高。

Radon 变换实时性较差,只能用于数据的后期处理。半边窗对准方法和与第一个回波对准的方法的运算速度较快,尤其后者的实时性很高。

### 3.2 相位补偿

完成舰船回波的距离对准,还要消除距离走动引入到回波中的附加相位。本文采用相位梯度自聚焦(PGA)算法和秩一相位估计(ROPE)结合的方法进行相位补偿<sup>[8]</sup>。所谓结合,即用ROPE算法中估计相位误差的迭代算子替换PGA算法的相位误差估计算子。这种算法的性能优于PGA算法和多普勒中心跟踪法。

### 3.3 空间变迹法(SVA)

在雷达成像中,通常使用加权以降低点目标响应较高的旁瓣,但是却带来主瓣的展宽,导致图像分辨率变差。空间变迹法(SVA)<sup>[9]</sup>是一种旁瓣抑制算法,针对SAR/ISAR复图像进行处理。与加权法相比,SVA算法在明显降低点目标响应副瓣的同时,不会展宽点目标响应的主瓣,从而可以得到更加清晰的图像。本文中,对得到的舰船目标图像进行了SVA处理。

## 4 舰船成像

本文从两批 SAR 实测数据中,提取出若干艘具有代表性的舰船数据,在本节给出部分 ISAR 成像结果。运动补偿后,一般通过在方位向进行傅里叶变换完成舰船目标的成像。对第一批数据中的舰船处理后,成像结果如图 1 至图 3 所示,同时给出了舰船的 SAR 图像。可以看见,用 ISAR

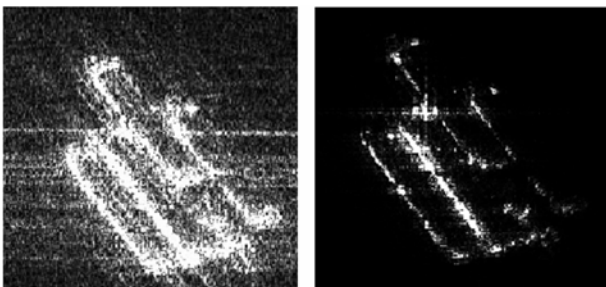


图 1 舰船 1 的 ISAR 图像和 SAR 图像

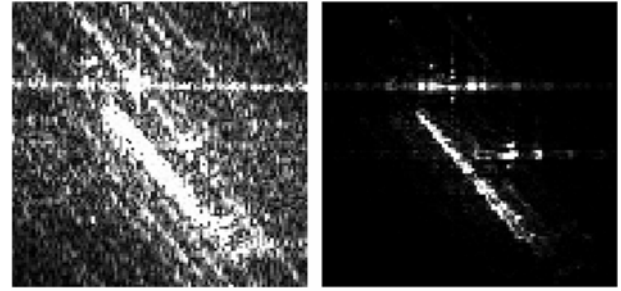


图 2 舰船 2 的 ISAR 图像和 SAR 图像

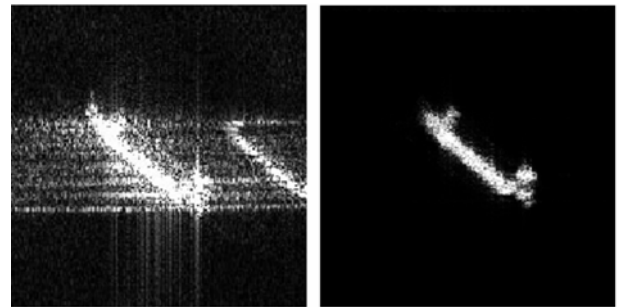


图 3 舰船 3 的 ISAR 图像和 SAR 图像

的方法对舰船成像,得到了更清晰的目标图像。

对各距离单元做多普勒分析进行方位向聚焦,是基于目标各散射点子回波的多普勒频率与散射点在图像投影平面上的方位向坐标成正比,即

$$f = 2x\Omega / \lambda \quad (1)$$

其中  $f$  是方位向多普勒频率,  $x$  是散射点在图像投影平面上的方位向坐标,  $\Omega$  和  $\lambda$  分别是目标与雷达之间的有效转动角速度和雷达工作波长。由式(1)可知,若在成像时间内目标相对于雷达的有效转动矢量方向和大小都不变,即目标成像投影平面和各散射点子回波的多普勒频率都不变,用 FFT 就可完成方位分辨。

将目标与雷达间的等效转动等价为目标在成像平面内作匀速转动只是一种近似,尤其当目标作机动运动时,不仅有效转动矢量的大小时变,其方向也是时变的。散射点子回波的多普勒频率在成像时间内的变化越大,用 FFT 处理,得到的图像越模糊。前面处理的舰船数据,通过 FFT 都可以得到聚焦良好的图像,主要原因是该批实测 SAR 数据录取时,海面比较平静,舰船自身摇摆较弱,在整个成像时间内的姿态基本没有变化,散射点子回波的多普勒频率变化较小,成像主要是依靠雷达载机与舰船之间的相对转动。

海情较高时,舰船在成像时间内摇摆较强,姿态有较剧烈的变化,导致散射点子回波的多普勒频率在成像时间内的变化较大,多普勒频率与方位向坐标之间不再具有一一对应关系。直接用 FFT 进行成像显然只能得到模糊的目标图像。为了得到清晰的舰船图像,除了进行复杂的运动补偿,消除多普勒时变,最后通过 FFT 进行成像,还可以借助时频分析<sup>[10]</sup>,通过短时傅里叶变换或对各距离单元做高分辨的时频变

换, 得到聚焦良好的目标瞬时像。

对另一批 SAR 实测数据中, 包含某舰船目标的 4096 个回波脉冲进行处理, 最后方位向 FFT 成像的结果如图 4 所示。从图中可以较清楚地看到交叉的两艘船, 根据前述成像原理可知, 这是由于成像时间内目标与雷达之间的转动矢量变化所致。对图中所示距离单元的回波信号进行时频分析(该距离单元仅包含一个强散射点), 其时频分布如图 5 所示。采用的这种时频分布是平滑伪 Wigner-Ville 分布 (SPWVD), 它属于科恩双线性时频分布类。该方法折衷选择了较高的时间和频率分辨率, 能够抑制 Wigner-Ville 分布的交叉性干扰。观察图 5 可知, 强散射点的多普勒频率在成像时间内并不是保持不变, 而是随时间呈近似正弦规律变化, 这意味着目标与雷达之间的有效转动角速度矢量也具有相同的变化规律。FFT 变换实际是时频分布对频率轴的积分投影, 因此对该舰船数据通过 FFT 成像, 得到了如图 4 所示的较模糊的成像结果。根据图 5 给出的时频分布图, 选择恒频特性较好的两段进行 FFT 成像, 得到聚焦良好的舰船图像, 结果如图 6(a)和 6(b)所示。其中图 6(a)对应的是以 A 点为中心的 512 个脉冲的成像结果, 而图 6(b)对应的是以 B 点为中心的 512 个脉冲的成像结果。

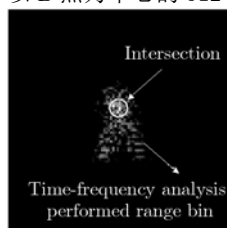


图 4 4096 个脉冲 FFT 成像结果

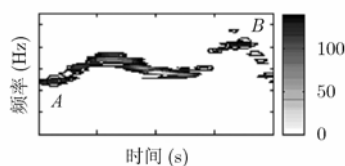


图 5 选取距离单元的时频分布

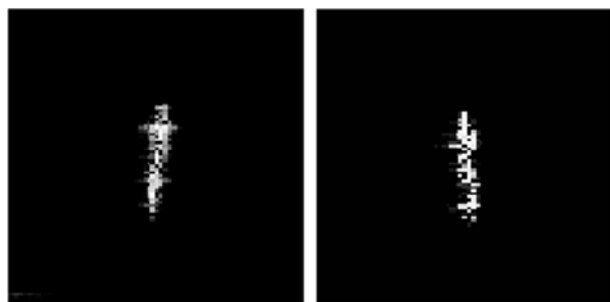


图 6 聚焦好的舰船图像

## 5 结束语

本文从机载 SAR 实测数据中提取出舰船目标的有效回波数据, 对舰船目标的成像进行了研究。基于舰船目标的非合作性, 采用 ISAR 的方法对其进行成像处理。运动补偿中, 舰船目标的回波的距离走动通常比较缓慢, 文中提供了 3 种有效的距离对准方法, 用于舰船目标回波的距离对准。相位

补偿采用 PGA 与 ROPE 结合的方法, 可以达到较高的补偿精度。若舰船在成像时间内没有姿态的剧烈变化, 成像采用常规的 FFT, 就可得到舰船目标的清晰图像。若舰船姿态在成像时间内变化较大, 可借助时频分析工具得到聚焦良好的目标图像。

## 参考文献

- [1] Stockburger E F and Held D N. Interferometric moving ground target imaging. Proc. of the IEEE International Radar Conference, Alexandria, Virginia, 1995: 438-443.
- [2] Tobin M E. Real time simultaneous SAR/GMTI in a tactical airborne environment. Proc. of EUSAR, Königswinter, Germany, 1996: 63-66.
- [3] Tobin M E and Greenspan M. Smuggling interdiction using an adaptation of the AN/APG-76 multimode radar. *IEEE AES Magazine*, 1996, 11: 19-24.
- [4] Zhu Zhaoda, She Zhishun, and Zhou Jianjiang. Multiple moving target resolution and imaging based on ISAR principle. National Aerospace and Electronics Conference, Dayton, Ohio, 1995, Vol.2: 982-987.
- [5] 王根原, 保铮. 逆合成孔径雷达运动补偿中包络对齐的新方法. *电子学报*, 1998, 26(6): 5-8.  
Wang Gen-yuan and Bao Zheng. A new algorithm of range alignment in ISAR motion compensation. *Acta Electronica Sinica*, 1998, 26(6): 5-8.
- [6] Steeghs P, and Kester L, et al. Radon transforms and time-frequency representation for ISAR motion compensation and imaging. Proc. of SPIE, 2002, Vol.4733: 252-263.
- [7] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理. 北京: 国防工业出版社, 1998: 153-156.
- [8] 汪玲, 朱兆达. ROPE 算法在 ISAR 运动补偿中的应用. *南京航空航天大学学报(英文版)*, 2004, 21(1): 64-68.  
Wang Ling and Zhu Zhao-da. ISAR motion compensation using rope. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2004, 21(1): 64-68.
- [9] Carrara W G, Goodman R S, and Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms. Boston: Artech House, 1995: 515-529.
- [10] Chen V C and Qian Shie. Joint time-frequency transform for radar range-Doppler imaging. *IEEE Trans. on AES*, 1999, 34(2):486-499.

汪玲: 女, 1977 年生, 讲师, 研究方向为雷达成像和信号处理。  
朱岱寅: 男, 1974 年生, 副研究员, 研究方向为雷达成像和信号处理。  
朱兆达: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号检测与处理。