

外场实测数据的舰船目标 ISAR 成像¹

邢孟道 保 铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘 要 有关飞机目标的 ISAR 成像国内已有较深入的研究, 对水面舰船的雷达成像在国防上同样有重要意义, 但国内对舰船的 ISAR 成像的研究, 基本上为空白状态。虽然舰船成像与飞机成像在基本原理上没有区别, 但由于海水的波动, 使舰船的姿态变化比较复杂, 有必要作专门的研究。该文是作者利用外场实测数据, 针对舰船运动的特殊性, 提出基于“Clean”的调幅-线性调频 (AM-LFM) 信号参数估计的方法, 获得舰船目标的距离-瞬时多普勒动态像。

关键词 ISAR, 舰船成像, 调幅-线性调频信号

中图分类号 TN951

1 引 言

舰船目标成像与飞机目标成像虽然其基本原理相同^[1,2], 但舰船目标的成像条件要比飞机目标复杂, 首先是由于舰船随海面波动而颠簸, 其姿态变化同时存在偏转 (yaw), 侧摆 (roll), 和俯仰 (pitch) 的三维运动^[3,4], 其次是海杂波的存在降低了目标回波的信噪比^[5]。这些都会给 ISAR 的平动补偿和成像处理造成困难。本文结合舰船目标的外场实测数据的处理, 对舰船这一类目标的 ISAR 成像进行了研究。

2 外场试验雷达简介

舰船实测数据录自近程试验雷达, 雷达设在海岸边, 其主要参数: 中心频率 f_c 为 9250MHz, 信号带宽 B 为 500MHz (LFM 信号), 信号脉宽 T_p 为 $600\mu\text{s}$, 重复频率 F 为 200Hz, 可见该雷达可得到约 0.3m 的距离分辨率。本文讨论的舰船目标距雷达 6km。

雷达用发射脉冲作为参考信号对回波信号进行解线调 (dechirp) 处理, 再作逆傅里叶变换的时频变换, 得到各次回波的一维复距离像, 图 1(a) 是以模值画出的舰船目标一维距离像, 可见海杂波是比较大的, 其信杂 (噪) 比要比一般飞机目标小 (对飞机目标, 无散射点回波处强度非常接近于 0), 对 256 次回波的一维距离像的模值画在回波序列-纵向距离的二维平面里, 得到目标回波包络的分布如图 1(b) 所示, 可见目标离雷达驶去, 其速度是较慢的, 经过 256 次发射 (约 1 秒多钟), 目标只移动了几米。

为了对这批目标数据进行成像, 首先要进行下面将讨论的平动补偿。

¹ 2000-04-30 收到, 2001-01-29 定稿
国家自然科学基金 (No: 69831040), 电科院资助课题

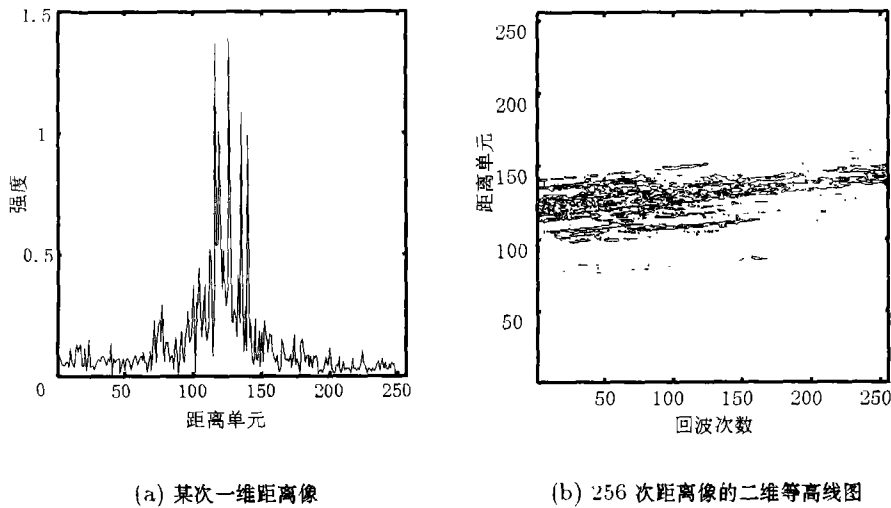


图1 某舰船目标的距离像

3 舰船目标的平动补偿

平动补偿可分为包络对齐和初相校正 (自聚焦) 两步进行, 也可以将两步合并进行. 我们先用常用的相邻相关法^[2]进行包络对齐, 回波的相邻相关系数比较大, 在 0.9 以上 (大部分在 0.95 以上, 这里限于篇幅不再画出相关曲线), 有一个点为 0.8, 是由于系统失常而造成回波畸变, 如果它也参与相邻相关包络对齐, 会产生突跳误差, 必须将不正常的回波剔除. 相关系数比较大, 同时也说明尽管由于海杂波的存在, 信噪比降低, 但对包络对齐影响不是很大, 而不用一抑制海杂波.

为了减小包络对齐的漂移误差, 我们采用半边窗的简化整体包络对齐方法^[8]. 这种包络对齐算法可以满足要求, 但还可作进一步改进, 这将在下面讨论.

在包络对齐的基础上, 进行初相校正一般有两种方法: 多特显点综合法^[6]和基于波形 (或

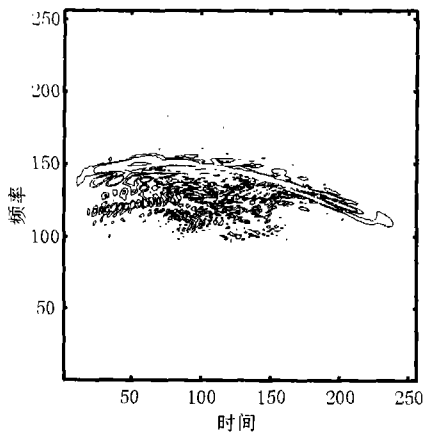


图2 某距离单元的时频分布

图形) 锐化度最大的参数估计法^[7]. 当目标平稳运动, 散射点子回波为复正弦时, 多特显点综合法较容易实现. 但如果目标的姿态变化复杂, 采用多特显点综合法要复杂得多. 前面提到过, 由于海面波动使舰船目标颠簸, 姿态变化比较复杂, 散射点子回波的多普勒是时变的. 图 2 画出自聚焦后某距离单元回波的时频分布 (时频变化为二次曲线), 另外也有时频变化为直线和高次曲线的距离单元, 这里限于篇幅未画出, 可见散射点的时频变化 (亦即运动) 情况是相当复杂的.

平动的参数补偿方法常设平动的相位变化为低次多项式, 由于目标惯性较大, 在秒级的时间里, 一般设为二次多项式, 即平动可以用速度和加速度作较精确的描述, 其三次相位项 (加加

速度) 可以忽略不记. 应当指出, 当目标作平稳运动而用距离-多普勒 (R-D) 算法成像, 相位变化的一次项只影响目标图像的横向位置, 对该项的系数可以不作精确估计. 同样, 对机动目标, 如果对回波作调幅-线性调频 (AM-LFM) 的时频分析, 而用距离-瞬时多普勒算法成像时, 相位变化的二次项会使不同时刻的图像在横向有不同的位移, 而不影响其形状. 因此, 当以得到目标动态图像形状为目的时, 相位的二次相位系数也不必精确估计.

基于上述原因, 可以将平动参数估计算法简化. 在前面用相关法作包络对齐时, 可得各次包络的移动值, 由于海杂波的存在, 信噪比降低, 相关法估计包络移动值有一定的误差, 所以包络移动值随回波序列的变化是粗糙的, 实际目标平动应当是平滑的, 所以用二次曲线对包络对齐推算出的平动值进行拟合 (对于本文舰船数据, 拟合出的是一条直线).

根据拟合的曲 (直) 线, 可以估计出较精确的目标平动变化, 用这一数值可以算出平动引起的相位变化作初相校正. 应当指出, 用曲线拟合方法其精度是不高的, 但前面已经指出, 当采用 AM-LFM 拟合的时频分析方法进行成像处理时, 由于相位一次项和二次项的系数仅影响图像的横向位置, 而不影响成像的形状, 不要求有很高的估计精度, 所以用二次多项式相位曲线进行拟合是可行的.

平动估计值曲线拟合前后之差在 ± 0.4 距离单元内, 且绝大多数的误差小于 ± 0.25 个距离单元, 所以, 如果认为曲线拟合后的数值是正确的, 则相关法包络方法是可以应用的. 但为了提高包络对齐的精度, 将相关法对齐后的包络按拟合后的曲线进行校正后, 得到包络对齐后的二维分布图如图 3 所示.

利用二次拟合曲线同时作包络对齐和初相校正, 属于一次性完成平动参数估计, 在目标作平稳运动时, 有用这种方法的, 那里要采用波形 (或图像) 锐化度最大作为估计准则^[7], 在这里则可以大大简化.

4 舰船目标的动态成像

将图 3 包络对齐后 (同时也完成初相校正) 的数据按通常的分距离单元作多普勒分析的 FFT 处理, 得到的图像如图 4 所示. 这个模糊的图像是不正确的, 因为图 2 已经表示许多散射点子回波的多普勒是时变的.

本文采用基于 “Clean” 的 AM-LFM 信号参数估计的方法, 获得舰船目标的距离-瞬时多普勒动态像.

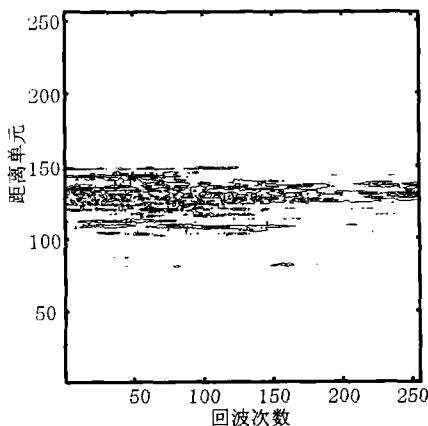


图 3 包络对齐后的二维分布图

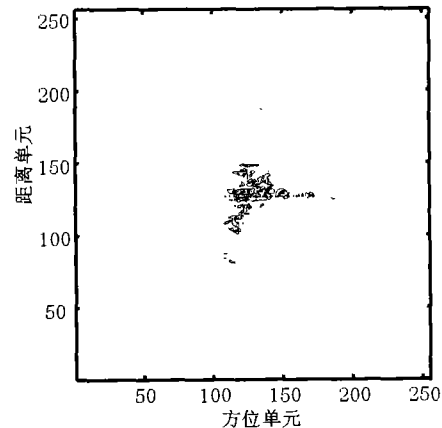


图 4 用 FFT 算法成像

4.1 基于多分量 AM-LFM 信号参数估计的瞬时成像方法

舰船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, 由于海水波动等原因, 使舰船的三维运动, 即偏转 (yaw), 侧摆 (roll), 俯仰 (pitch) 比较明显, 各散射点子回波为 AM-FM 信号, 这一点可以从图 2 的时频分布中可以看出, 一定程度上, 可以近似为 AM-LFM 信号, 或者近似为分段的 AM-LFM 信号, 这样各距离单元的信号为噪声和杂波背景下的多分量 AM-LFM 信号, 对舰船目标的瞬时成像, 就是在噪声和杂波背景下, 多分量 AM-LFM 信号瞬时参数估计问题。

设含有 P 个分量的 AM-LFM 信号模型可以表示为

$$s(t) = \sum_{i=1}^P a_i(t) e^{j2\pi(f_{0i}t + m_i t^2/2) + j\varphi_{0i}} + e(t) \quad (1)$$

其中 $a_i(t)$ 为实变量, 对等幅线性调频信号 $a_i(t)$ 为实常数, 幅度变化为慢变化, 通常可认为是窄带信号。因为 $s(t)$ 为多个 AM-LFM 分量的线性相加, 所以我们先分析单分量情况, 设信号

$$s(t) = a(t) e^{j2\pi(f_0 t + m t^2/2) + j\varphi_0} + e(t) \quad (2)$$

$s(t)$ 的傅里叶变换为

$$F[s(t)] = e^{j\varphi_0} F[a(t)] \otimes \delta(\omega - 2\pi f_0) \otimes F[e^{j\pi m t^2}] + F[e(t)] \quad (3)$$

因为 $a(t)$ 为慢变化, 其谱 $F[a(t)]$ 为集中于零频附近的窄谱, $\delta(\omega - 2\pi f_0)$ 为 $e^{j2\pi f_0 t}$ 的谱, $F[e^{j\pi m t^2}]$ 为调频因子的谱, m 越大其谱越宽。

我们通常用解线调 (dechirping) 的方法估计调频率 m , 即对待测信号 $s(t)$ 乘以负的线性调频因子 $e^{-j\gamma t^2/2}$, 当 γ 值等于实际信号的调频率 m 时, 调频信号成为单频信号。假设

$$f_\gamma(t) = s(t) e^{-j\gamma t^2/2} \quad (4)$$

若 $\gamma = m$, 则 $f_\gamma(t) = a(t) e^{j2\pi f_0 t + j\varphi_0}$, $f_\gamma(t)$ 的傅氏变换 $F[f_\gamma(t)] = e^{j\varphi_0} F[a(t)] \otimes \delta(\omega - 2\pi f_0)$ 为集中于起始频率 f_0 附近的一个窄谱, 由窄谱的峰的位置, 估计得到 f_0 。实际搜索方法为: 改变 γ 并对每次 $f_\gamma(t)$ 作傅里叶变换并取模, 而画出初始频率 f_0 和调频率 γ 的二维分布图, 从峰值点位置得到待估计 LFM 信号的两个参数 f_0 和 m 的估计值。

估计出初始频率 f_0 和调频率 m 后, 对原信号解调频并把频谱移到零频, 有

$$y(t) = s(t) e^{-j2\pi(f_0 t + m t^2/2)} = a(t) e^{j\varphi_0} + e(t) e^{-j2\pi(f_0 t + m t^2/2)} \quad (5)$$

对 (5) 式作傅里叶变换, 零频处的相角为 φ_0 的估计, 把零频附近的窄谱滤出, 作逆傅里叶变换, 就得到 $a(t)$ 的估计。实际在作傅里叶变换时需要加窗, 以减小旁瓣, 逆傅里叶变换后要除以窗系数。

对多分量 AM-LFM 信号, 在初始频率 f_0 和调频率 γ 的二维分布图上出现多个峰值, 根据各峰值点位置得到各个分量的 f_{0i} 和 m_i 的估计值。在这些峰值点位置, 把初始频率 f_0 方向的所有窄谱滤出, 并移到零频, 作逆傅里叶变换取模, 就得到各个分量的 $a_i(t)$ 的估计。

实际中, 由于对初始频率 f_0 和调频率 γ 作二维搜索运算量大, 特别对 γ 的精度要求越高, 其搜索维数越大, 所以我们采用 “Clean” 方法从大到小逐个估计各个 AM-LFM 分量。

设原始信号由 P 个 AM-LFM 分量和白噪声组成,

$$s(n) = \sum_{i=1}^P a_i(nT_a) e^{j2\pi(f_{0i}nT_a + m_i(nT_a)^2/2) + j\varphi_{0i}} + e(nT_a), \quad n = 1, \dots, N \quad (6)$$

估计第 k 个 AM-LFM 分量的频率 f_{0k} 和调频率 γ_k 由 $s_{k-1}(n)$ 的二维分布 $C(f_0, \gamma)$ 的峰值点确定,

$$C(f_0, \gamma) = \sum_{n=1}^N \{[s_{k-1}(n) \cdot e^{-j2\pi(f_0(nT_a) + \gamma(nT_a)^2/2)}]\} / N \quad (7)$$

其中 $s_{k-1}(n)$ 为原始信号减掉已估计的 $k-1$ 个 AM-LFM 分量,

$$\{\hat{f}_{0k}, \hat{m}_k\} = \arg \max |C(f_0, \gamma)| \quad (8)$$

为利用 FFT, f_{0k} 和 γ_k 的估计可由下式快速实现,

$$\{\hat{f}_{0k}, \hat{m}_k\} = \max_{\gamma} \{ \max_{f_0} \{ \text{FFT}[s_{k-1}(n) \cdot e^{-j\pi\gamma(nT_a)^2}] / N \} \} \quad (9)$$

初相为峰值点的相位,

$$\hat{\varphi}_{0k} = \text{angle}(C(\hat{f}_{0k}, \hat{m}_k)) \quad (10)$$

时变幅度通过把过峰值点的频谱移到零频, 滤出后估计得到, 即由下式获得

$$\hat{a}_k(nT_a) = \text{Abs}[\text{IFT}(\text{Win}_k(f) \cdot \text{FFT}(s_{k-1}(n) \cdot e^{-j\Phi_k}))] \quad (11)$$

这里 $\Phi_k = \hat{\varphi}_{0k} + 2\pi(\hat{f}_{0k}(nT_a) + \hat{m}_k(nT_a)^2)$, $\text{Win}_k(f) = \begin{cases} 1, & f_{Lk} < f < f_{Rk} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$ 为第 k 个分量

的频域窗函数, 其中 $f_{Rk} > 0$, $f_{Lk} < 0$, 其数值根据零频左右的谱宽度确定. 在频域减掉已估计的第 k 个 AM-LFM 分量后, $s_k(n)$ 为

$$s_k(n) = \text{IFT}((1 - \text{Win}_k(f)) \cdot \text{FFT}(s_{k-1}(n) e^{-j\Phi_k})) e^{j\Phi_k} \quad (12)$$

其中 $n = 1, \dots, N$.

“Clean”方法步骤为:

第 1 步 $k=1$, 即 $s_0(n) = s(n)$, 根据 (9), (10) 和 (11) 式估计第 1 个 AM-LFM 分量的初始频率, 调频率, 初相, 时变幅度, 并根据 (12) 式在原始信号中把此分量减掉.

第 2 步 $k=2$, 根据 (9), (10) 和 (11) 式估计第 2 个 AM-LFM 分量的初始频率, 调频率, 初相, 时变幅度, 通过 (12) 式在频域再减掉已估计的第 2 个的 AM-LFM 分量.

后续步骤 当 $k=K$ 时, 根据 (9), (10) 和 (11) 式估计第 K 个 AM-LFM 分量的初始频率, 调频率, 初相, 时变幅度, 通过 (12) 式在频域再减掉已估计的第 K 个的 AM-LFM 分量, 直到剩余信号的能量较小 (通常使剩余能量为原来能量的 0.1), 或者使 k 为需要估计的分量个数 P (分量个数 P 一般取 4 和 5).

在估计每个 AM-LFM 分量参数过程中, 除了对参数 γ 需要搜索外, 只需简单 FFT, 求最大值, 和乘法运算, 算法实现容易, 运算效率高. 而且对参数 γ 的搜索可以先确定 γ 的大致范围, 然后分级搜索的方法大大减小运算量, 每级搜索 11 个点, 下一级的搜索范围比上一级缩小十分之一, 一般三级到四级就足够了.

4.2 舰船目标的瞬时成像结果

我们采用上述瞬时成像方法,对舰船目标依次取 256 次回波采用基于多分量 AM-LFM 信号参数估计的瞬时成像方法进行动态成像(结果见图 5),成像时刻为中间时刻。横向为距离单元,单位为 0.3m,纵向为瞬时多普勒单元,单位为 $(1/5.12)\text{Hz}$ 。

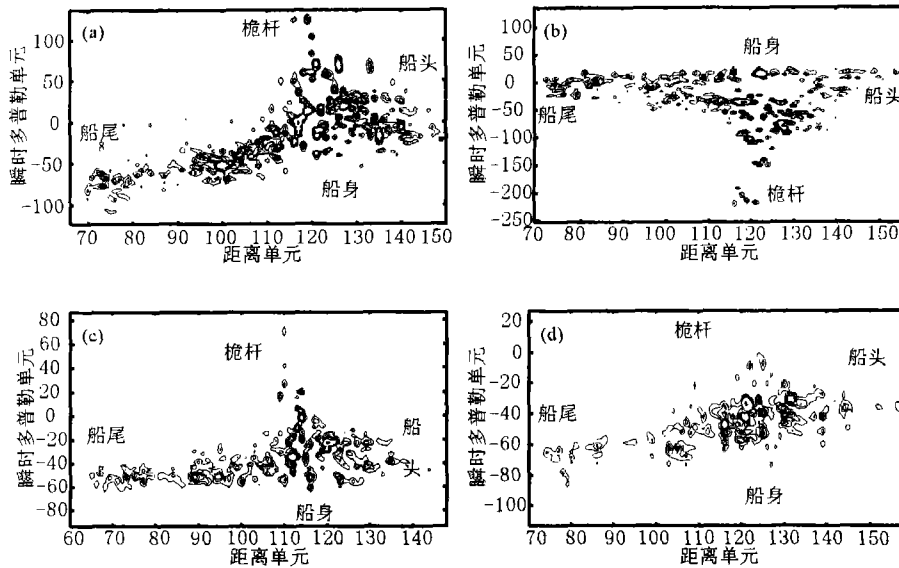


图 5 某舰船目标的动态成像结果

从舰船的成像结果可见,它在观测过程中离雷达驶远,其姿态的转动以俯仰为主,多普勒表示散射点前后向运动。图 5(a), 5(c), 5(d) 为船身上仰情况,图像为船的侧视图,桅杆向雷达运动,多普勒为正。图 5(b) 同样为船身俯仰而形成的侧视图,此时船身为下俯,桅杆离开雷达,其多普勒为负,形成侧视船像的“倒像”。从这 4 个图像,可以清晰的看到舰船的形状。

5 结 论

从些实测数据来看,舰船目标成像,主要是两个问题,一是海浪等原因使目标的三维运动比较明显,机动性较强,二是海杂波降低了信噪比。由于目标不是很大, f_c/B 比较大,距离走动不明显。又由于目标的转台中心到雷达的距离可用一次直线或二次曲线近似,聚焦比较简单,如果考虑对高次相位误差进行补偿,需要从散射点子回波相位为多项式相位出发,研究自聚焦相位补偿。

参 考 文 献

- [1] D. A. Ausherman, A. Kozma, J. L. Walker, H. M. Jones, E. C. Poggio, Developments in radar imaging, IEEE Trans. on AES, 1984, AES-20(4), 363-400.
- [2] C. C. Chen, H. C. Andrews, Target-motion-induced radar imaging, IEEE Trans. on AES, 1980, AES-16(1), 2-14.
- [3] 保 铮, 王根原, 具有三维转动目标的逆合成孔径雷达成像算法, 西安电子科技大学学报, 1997, 24(增刊), 1-9.
- [4] Bao Zheng, Wang Genyuan, Luo Lin, Inverse synthetic aperture radar imaging of maneuvering targets, Optical Engineering, 1998, 37(5), 1582-1588.

- [5] A. Jain, I. Patel, SAR/ISAR imaging of a nonuniformly rotating target, IEEE Trans. on AES, 1992, AES-28(1), 317-321.
- [6] Wei Ye, Tat Soon Yeo, Zheng Bao, Weighted least-squares estimation of phase errors for SAR/ISAR autofocus, IEEE Trans. on GRS, 1999, GRS-37(5), 2487-2494.
- [7] B. Fabrizio, C. Giovanni, Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization, IEEE Trans. on AES, 1996, AES-32(3), 1185-1191.
- [8] 邢孟道, 保 铮, 一种逆合成孔径雷达成像包络对齐的新方法, 西安电子科技大学学报, 2000, 27(1), 93-96.

ISAR SHIP IMAGING OF REAL DATA

Xing Mengdao Bao Zheng

(Key Lab. for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract ISAR imaging of airplane has been researched thoroughly in China. But research on ISAR imaging for ship, which is also very important in national defense, is very little. Although the difference is little in principle between airplane imaging and ship imaging, the pose variation of ship is more complicate for the fluctuation of sea, so it need to be studied specially. This paper employs Range-Instantaneous Doppler Algorithm (RIDA) based on multicomponent Amplitude Modulation and Linear Frequency Modulation (AM-LFM) signal parameter estimation method to obtain good ship ISAR images from real data.

Key words ISAR, Ship imaging, RIDA, AM-LFM

邢孟道: 男, 1975 年生, 博士生, 专业: 信号与信息处理, 研究方向: 雷达成像和目标识别.

保 铮: 男, 1927 年生, 教授, 中科院院士, 博士生导师, 主要研究领域为信号处理和雷达系统.