

基于自适应 Chirplet 分解的舰船目标 ISAR 成像

王 勇 姜义成

(哈尔滨工业大学电子工程技术研究所 哈尔滨 150001)

摘 要 相对于飞机目标的 ISAR 成像, 舰船目标的 ISAR 成像同样具有重要意义, 但国内对舰船目标的成像研究刚刚开始。由于舰船运动的复杂性, 使得舰船目标的成像条件要比飞机目标复杂得多, 传统的针对飞机目标的成像方法已经不能满足要求。因此, 该文提出了基于自适应 Chirplet 分解的舰船目标成像方法, 得到了舰船不同时刻的瞬态 ISAR 像。

关键词 ISAR, 舰船目标, Chirplet 分解

中图分类号: TN958, TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)06-0982-03

The ISAR Imaging of Ship Based on Adaptive Chirplet Decomposition

Wang Yong Jiang Yi-cheng

(Research Institute of Electronic Engineering Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract The ISAR imaging of ship is significant relative to plane. The imaging condition of ship is more complicated than plane due to the complexity of the ship's movement, and the conventional ISAR imaging algorithm to the plane can not be satisfactory to the ship. So, a new method based on adaptive Chirplet decomposition is proposed here, the instantaneous ISAR ship image is obtained.

Key words ISAR, Ship target, Chirplet decomposition

1 引言

相对于飞机目标的 ISAR 成像, 舰船目标的 ISAR 成像同样具有重要意义。但国内对舰船目标的成像研究刚刚开始, 虽然舰船目标成像与飞机目标成像的基本原理相同, 都是基于距离-多普勒原理^[1], 其纵向分辨依靠雷达发射宽带信号来实现, 横向分辨则利用散射点的多普勒频移而实现, 但舰船目标的成像条件要比飞机目标复杂得多, 主要表现为: 海杂波的存在降低了回波信号的信噪比, 而且由于海面的波动起伏, 使舰船的姿态变化比较复杂, 同时伴有偏转(yaw)、俯仰(pitch)和侧摆(roll)的三维运动, 这给舰船的 ISAR 成像带来了困难。文献[2]证明, 海杂波的存在对回波信号的运动补偿影响不大, 可采用传统的包络对齐和相位校正方法, 同时提出一种基于调幅-线性调频信号参数估计的方法获得舰船目标的动态像。但由于舰船目标运动情况很复杂, 其散射点子回波应为多分量的调幅-调频(AM-FM)信号, 这给信号的参数估计带来了很大困难。对于 AM-FM 信号, 文献[3]提出了自适应 Chirplet 分解的概念, 通过对信号进行自适应投影分解, 将其分解成为一系列最佳基函数的线性组合, 可以了解有关信号的更细节、更全面的信息。针对自适应 Chirplet 分解未知参

数多, 计算量大的特点, 本文提出了简化的参数估计算法, 并通过松弛(RELAX)技术^[4]来提高参数估计精度。最后对舰船目标外场实测数据进行了基于自适应 Chirplet 分解的动态成像, 成像结果验证了本文方法的有效性。

2 目标三维转动对 ISAR 成像的影响

虽然目标是三维物体, 但 ISAR 只具有二维分辨能力, 即沿雷达视线方向的距离分辨力和垂直于转轴与雷达视线所组成平面方向的横向分辨力。对于舰船目标, 目标的实际转动可分解为三个分量: 偏转(yaw)、俯仰(pitch)和侧摆(roll), 此时成像的投影平面会发生变化^[5]。

设雷达视线的单位矢量为 \mathbf{r} , 机动目标的合成转动矢量为 $\boldsymbol{\Omega}$, 下面建立雷达视线坐标系 xyz , 如图 1 所示。z 轴与 \mathbf{r} 轴重合, 使 x 轴位于 z 轴和 $\boldsymbol{\Omega}$ 轴所确定的平面内。 $\boldsymbol{\Omega}$ 轴和 z 轴的夹角为 β , 由下式得到 y 轴。

$$\mathbf{y} = \mathbf{z} \times \mathbf{x} \quad (1)$$

其中 \mathbf{x} , \mathbf{y} , \mathbf{z} 分别代表 x 轴, y 轴和 z 轴的单位矢量, \times 代表矢量的外积。

图 1 中原点 O 为平动补偿的自聚焦点, 散射点 P 的位置用矢量 $\mathbf{R}(x_1, y_1, z_1)$ 表示, 该散射点回波的多普勒频率为

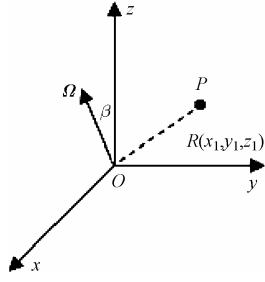


图1 雷达视线坐标系

Fig.1 Coordinate of radar line of sight

$$\omega = \frac{4\pi}{\lambda} [(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}) \cdot \mathbf{r}] = \frac{4\pi}{\lambda} [(\mathbf{r} \times \boldsymbol{\Omega}) \cdot \mathbf{R}] = \frac{4\pi}{\lambda} \Omega y_1 \sin \beta \quad (2)$$

其中 λ 为雷达波长, \cdot 代表矢量的内积。

由于目标的合成转轴 $\boldsymbol{\Omega}$ 是时变的, 其大小 Ω 和方向 β 都可能随时间发生变化, 这些都会使 ω 发生变化, 导致了成像投影平面也发生变化, 对于舰船目标, 成像的形状和姿态会随之发生变化。

3 自适应 Chirplet 分解

自适应 Chirplet 分解是以基函数与待分析信号最相似的原则来选择基的, 将待分析信号 $s(t)$ 表示为一组线调频小波基 $g_n(t)$ 的线性叠加:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n g_n(t) \quad (3)$$

$$g_n(t) = (\pi\sigma_n^2)^{-0.25} \exp \left\{ -\frac{(t-t_n)^2}{2\sigma_n^2} + j\omega_n(t-t_n) + j\beta_n(t-t_n)^2 \right\} \quad (4)$$

其中 $\sigma_n, t_n, \omega_n, \beta_n$ 分别表示线调频小波基的宽度, 时间中心, 初始频率和调频率。

基函数按照下列准则逐个自适应估计:

$$|C_n|^2 = \max_{g_n} | \langle s_n(t), g_n(t) \rangle |^2 \quad (5)$$

其中

$$s_n(t) = s_{n-1}(t) - C_{n-1}g_{n-1}(t), \quad s_0(t) = s(t) \quad (6)$$

$s_n(t)$ 是 $s_{n-1}(t)$ 向基函数 $g_{n-1}(t)$ 作正交投影后的剩余量, 可以表示为

$$s_n(t) = s(t) - \sum_{i=1, i \neq n}^M C_i g_i(t) \quad (7)$$

M 为高斯基个数。

采用式(5)~式(7)的方法, 可完成对信号 $s(t)$ 的分解。

从式(5)可以看出, 系数 C_n 的计算是一个多维非线性优化问题, 通常, 没有解析形式的解, 如果采用遍历整个参数空间的穷搜索方法进行估计, 运算量将是相当大的。文献[6、7]中也针对线性调频基提出了参数估计的简化算法, 但仍需要在一定范围内进行参数搜索, 或者自适应迭代等, 不利于具体的应用。本节对此进行了简化, 同时引入松弛 (RELAX) 技术进一步提高参数的估计精度。

3.1 单分量信号参数估计

本文均假定待分析信号具有线性调频信号的特点。对于

线性调频信号, 可以利用信号本身所包含的参数信息和信号自身的特点, 采用已有的一些信号处理方法来获得参数的估计值。计算式(4)的 Wigner-Ville 分布, 可得

$$\text{WVD}_{g_n}(t, \omega) = \frac{1}{\pi} \exp \left\{ -\frac{(t-t_n)^2}{2\sigma_n^2} - 4\sigma_n^2 [(\omega - \omega_n)/2 - \beta_n(t-t_n)]^2 \right\} \quad (8)$$

可见, 线调频小波基 $g_n(t)$ 的 Wigner-Ville 分布集中在直线

$$\omega = 2\beta_n t + (\omega_n - 2\beta_n t_n) = 2\beta_n t + \varpi_n \quad (9)$$

上, 其中 $\varpi_n = \omega_n - 2\beta_n t_n$ 。所以, 可以采用传统的 Radon-Wigner 变换方法计算待分析信号的调频率, 得到 β_n 的估值 $\hat{\beta}_n$ 。整个参数估计过程如下:

(1) 计算待分析信号 $s(t)$ 的 Radon-Wigner 变换, 得到其调频率的估计值 $\hat{\beta}$ 和 ϖ_n 的估计值 $\hat{\varpi}$ 。

(2) 构造线性调频信号 $z(t) = e^{-j\hat{\beta}t^2}$, 然后计算下式:

$$\hat{\omega}_0 = \max_{\omega_0} [\text{FFT}(s(t)z(t))] \quad (10)$$

(3) 设计一带宽极窄的带通滤波器把 $\hat{\omega}_0$ 附近的窄谱滤出, 并做 Fourier 反变换, 得到信号近似正弦信号 $u(t)$, 即

$$u(t) = \text{IFT} \{ \text{window}(\omega) \bullet \text{FFT}[s(t)z(t)] \} \quad (11)$$

其中, $\text{window}(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega_L < \omega < \omega_R \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ 为带通滤波器, ω_L, ω_R

的数值根据窄谱的宽度确定。

(4) 计算信号 $u(t)$ 的 Wigner-Ville 分布, 得到 $s(t)$ 的时间中心估计值 \hat{t} , 即

$$\hat{t} = \arg \max_t [\text{WVD}_u(t, \omega)] \quad (12)$$

(5) 计算 $s(t)$ 初始频率的估计值 $\hat{\omega}$, 即

$$\hat{\omega} = \hat{\varpi} + 2\hat{\beta}\hat{t} \quad (13)$$

(6) 计算信号 $s(t)$ 宽度的估计值 $\hat{\sigma}$, 即

$$\hat{\sigma} = \arg \max_{\sigma} | \langle s(t), g(t) \rangle |^2 \quad (14)$$

其中

$$g(t) = (\pi\sigma^2)^{-0.25} \exp \left\{ -\frac{(t-\hat{t})^2}{2\sigma^2} + j\hat{\omega}(t-\hat{t}) + j\hat{\beta}(t-\hat{t})^2 \right\} \quad (15)$$

(7) 利用式(5)计算系数 C 的估计值 \hat{C} 。

用上述方法, 可以估计单分量线性调频信号的所有参数, 而且整个过程只需简单的 FFT, 求最大值和乘法运算, 运算效率高, 算法实现容易。

3.2 多分量信号参数估计

对于多分量信号, 这里引入 RELAX 技术, 在估计当前分量的参数时, 固定其余分量的参数, 逐个依次调整, 以达到内部收敛, 具体算法如下:

(1) 设 $n=1$, 令 $s_1(t)=s(t)$, 从 $s_1(t)$ 中计算 $\{\hat{\sigma}_1, \hat{t}_1, \hat{\omega}_1, \hat{\beta}_1, \hat{C}_1\}$, 方法如上节所述。

(2) 设 $n=2$, 由第一步得到的 $\{\hat{\sigma}_1, \hat{t}_1, \hat{\omega}_1, \hat{\beta}_1, \hat{C}_1\}$, 根据式(7)计算信号 $s_2(t)$, 得到 $\{\hat{\sigma}_2, \hat{t}_2, \hat{\omega}_2, \hat{\beta}_2, \hat{C}_2\}$, 由 $\{\hat{\sigma}_2, \hat{t}_2, \hat{\omega}_2,$

$\hat{\beta}_2, \hat{C}_2\}$ 根据式(7)计算信号 $s_1(t)$, 再得到 $\{\hat{\sigma}_1, \hat{t}_1, \hat{\omega}_1, \hat{\beta}_1, \hat{C}_1\}$, 迭代, 直至内部收敛。

(3) 设 $n=3$, 由 $\{\hat{\sigma}_1, \hat{t}_1, \hat{\omega}_1, \hat{\beta}_1, \hat{C}_1\}$, $\{\hat{\sigma}_2, \hat{t}_2, \hat{\omega}_2, \hat{\beta}_2, \hat{C}_2\}$ 根据式(7)计算信号 $s_3(t)$, 得到 $\{\hat{\sigma}_3, \hat{t}_3, \hat{\omega}_3, \hat{\beta}_3, \hat{C}_3\}$; 类似, 由 $\{\hat{\sigma}_2, \hat{t}_2, \hat{\omega}_2, \hat{\beta}_2, \hat{C}_2\}$, $\{\hat{\sigma}_3, \hat{t}_3, \hat{\omega}_3, \hat{\beta}_3, \hat{C}_3\}$ 得到 $s_1(t)$; 由其更新 $\{\hat{\sigma}_1, \hat{t}_1, \hat{\omega}_1, \hat{\beta}_1, \hat{C}_1\}$, 由 $\{\hat{\sigma}_1, \hat{t}_1, \hat{\omega}_1, \hat{\beta}_1, \hat{C}_1\}$, $\{\hat{\sigma}_3, \hat{t}_3, \hat{\omega}_3, \hat{\beta}_3, \hat{C}_3\}$ 得到 $s_2(t)$; 由其更新 $\{\hat{\sigma}_2, \hat{t}_2, \hat{\omega}_2, \hat{\beta}_2, \hat{C}_2\}$, 由 $\{\hat{\sigma}_1, \hat{t}_1, \hat{\omega}_1, \hat{\beta}_1, \hat{C}_1\}$, $\{\hat{\sigma}_2, \hat{t}_2, \hat{\omega}_2, \hat{\beta}_2, \hat{C}_2\}$ 得到 $s_3(t)$; 由其更新 $\{\hat{\sigma}_3, \hat{t}_3, \hat{\omega}_3, \hat{\beta}_3, \hat{C}_3\}$, 迭代直至内部收敛。

(4) 增加基函数个数 n , 依次计算各个信号分量参数, 直到剩余信号能量小于某一阈值 ε 为止, 即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |s_{\text{res}}(t)|^2 dt \leq \varepsilon \quad (16)$$

算法中每一步的内部收敛可通过一次内部循环迭代后, 逼近误差的相对变化是否小于一常数来判定, 一般取该常数为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 即可。通过 RELAX 技术, 极大地提高了信号参数的估计精度。

4 舰船目标 ISAR 成像结果

本节所用舰船实测数据源自近程试验雷达, 雷达位于海岸边, 发射线性调频信号。主要参数为: 载频 9250MHz, 信号带宽 500MHz, 脉宽 600 μ s, 脉冲重复频率 200Hz, 积累脉冲数 256。对回波数据进行运动补偿, 其中包括对齐采用积累互相关法, 相位校正采用恒定相位差法, 补偿后某一距离单元回波数据的 Wigner-Ville 分布如图 2(a)所示, 可见散射点子回波的多普勒是时变的, 而且时频变化为高次曲线, 同时伴有大量交叉项和噪声干扰。图 2(b)为经过自适应 Chirplet 分解后的 Wigner-Ville 分布, 交叉项和噪声干扰都得到了抑制。

将运动补偿后的数据采用传统的 DFT 方法得到的图像如图 3 所示, 由于舰船的高机动性, 这个图像是不正确的。而采用本文提出的基于自适应 Chirplet 分解的方法得到的舰船目标不同时刻动态像如图 4(a), 图 4 (b)所示。可见, 不同时刻舰船的姿态发生了较大变化, 而且可以清晰的看到舰船的形状。

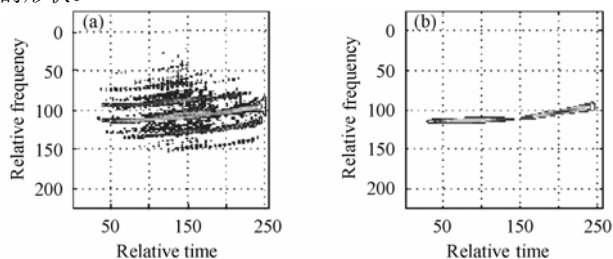


图2 舰船目标回波某一距离单元时频分布图

(a)Wigner-Ville 分布 (b)自适应 chirplet 分解后的 Wigner-Ville 分布

Fig.2 Time-frequency distribution of a range bin of the ship echo

(a)Wigner-Ville distribution (b) Wigner-Ville distribution after adaptive chirplet decomposition

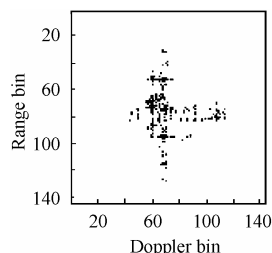


图3 传统 DFT 方法成像结果

Fig.3 ISAR image based on DFT

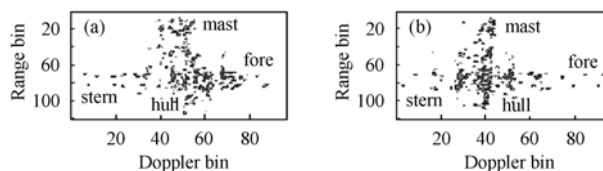


图4 舰船目标动态成像结果

Fig.4 The dynamic ISAR images of ship target

5 结束语

由于舰船目标运动的复杂性, 使得舰船目标的成像条件要比飞机目标复杂得多, 传统的针对飞机目标的成像方法已经不能满足要求。因此, 本文提出了基于自适应 Chirplet 分解的舰船目标成像方法, 通过 RELAX 技术提高了参数的估计精度, 从而得到了舰船不同时刻的瞬态 ISAR 像, 外场实测数据成像结果验证了本文方法的有效性。

参考文献

- [1] Chen C C, Andrews H C. Targets-motion-induced radar imaging. *IEEE Trans. on AES*, 1980, 16 (1): 2-14.
- [2] 邢孟道, 保铮. 外场实测数据的舰船目标 ISAR 成像. *电子与信息学报*, 2001, 23(12): 1271-1277.
- [3] Mann Steve, Haykin Simon. The chirplet transform: physical considerations. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1995, 43(11): 2745-2761.
- [4] Li J, Stoica P. Efficient mixed spectrum estimation with applications to target feature extraction. *IEEE Trans. on Signal Processing*. 1996, 44(2): 281-296.
- [5] 保铮, 王根源. 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(1): 1-9.
- [6] 邹虹, 保铮. 一种有效的基于 Chirplet 自适应信号分解算法. *电子学报*, 2001, 29(4): 515-517.
- [7] 殷勤业, 倪志芳. 自适应旋转投影分解法的快速实现. *通信学报*, 1998, 19(1): 22-28.

王 勇: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为非平稳信号的时频分析及其在合成孔径雷达成像中的应用。

姜义成: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、目标识别技术等。