

海面运动舰船目标的高分辨率 SAR 成像

汤立波 李道京 吴一戎 丁赤飏

(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室 北京 100080)

(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要 基于高分辨率机载 SAR, 研究了合成孔径成像时间较长情况下海面运动舰船目标的 SAR 成像问题。根据船体上不同距离单元散射点多普勒历程可能不同的特点, 采用粗校正和精校正相结合的方法在距离频率-方位时间域进行二阶和高阶相位补偿, 完成运动舰船目标的距离徙动校正。提出了 STFT 和 CDA 处理相结合的时频分析成像方法, 以获得较高的图像分辨率。实际数据的处理结果表明了该方法的有效性。

关键词 合成孔径雷达, 舰船目标成像, 运动目标成像, 时频分析

中图分类号: TN958, TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)04-0624-04

High Resolution SAR Imaging of Moving Ship Targets at Sea

Tang Li-bo Li Dao-jing Wu Yi-rong Ding Chi-biao

(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics, Chinese

Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The SAR imaging of moving ship targets at sea is investigated based on high resolution airborne SAR with longer synthetic aperture time. Because the scatterers at different range cells may have different Doppler characteristics, the range migration correction for moving ship is completed by coarse and fine correction procedures. The compensations of second and higher order phase terms are implemented in "range frequency - azimuth time" domain. A new time-frequency analysis imaging method is presented for higher image resolution by means of the combination of Short Time Fourier Transform (STFT) and Complex Dual Apodization (CDA). The imaging results of real SAR data show the effectiveness of this method.

Key words SAR, Ship target imaging, Moving target imaging, Time-frequency analysis

1 引言

海面上运动的舰船目标由于波浪的作用存在复杂的运动形式, 除了舰船本身的运动外, 还存在横摇、纵摇和偏航运动。这就给海面运动舰船目标高分辨率 SAR(Synthetic Aperture Radar)成像造成很多困难, 这不仅是因为 SAR 和目标都在运动, 而且也因为舰船的复杂运动形式使其船体上的散射点在三维空间的运动规律很难估计^[1,2]。

除距离走动外, 由于体积较大, 船体的小角度晃动即会产生散射点距离分辨单元跨越问题(尤其是高度较高的散射点), 导致图像距离向展宽和方位向散焦现象。同时, 由于其复杂的运动形式, 船体上不同散射点的多普勒历程很难一致, 致使常用的自聚焦方法(如 PGA)很难奏效。

与地面运动目标一样, 海面舰船目标图像可建立在距离

-方位多普勒频率(r, f_d)域, 常用的成像算法有: 基于 FFT 的距离-多普勒(RD)算法, 极坐标格式处理法(PFA)。随着技术的发展, 近年来时频分析在其成像中也得到了广泛的应用^[1,3]。

SAR 在对海面舰船目标成像时, 尽管其成像的复杂性随着合成孔径成像时间的增长而加剧, 但长的合成孔径成像时间就意味着更高的方位分辨率。本文研究了合成孔径成像时间较长情况下海面运动舰船目标的高分辨率 SAR 成像问题。

2 距离徙动校正

在舰船目标的 SAR 成像中, 由于舰船目标的复杂运动形式, 在合成孔径成像时间较长情况下(10s 量级), 船上散射点的多普勒历程是非线性时变的, 并具有一定的周期性, 从而使其距离徙动校正问题较为复杂。

设 SAR 目标回波信号为

$$s(t', t_k) = \sum_{n=1}^N A_n p \left[t' - \frac{2R_n(t_k)}{c} \right] \cdot \exp \left[i \frac{4\pi f_c R_n(t_k)}{c} \right] \quad (1)$$

其中 f_c 是载波频率, $p(t')$ 是线性调频脉冲, t' 是距离向时间, t_k 是方位向时间, A_n 是第 n 个散射点的强度, N 为散射点的个数, $c = 3 \times 10^8$ m/s 为电磁波传播速度。对信号 $s(t', t_k)$ 在距离向时间 t' 域作傅里叶变换有

$$s(f, t_k) = p(f) \sum_{n=1}^N A_n \exp \left[i \frac{4\pi(f_c + f)}{c} R_n(t_k) \right] \quad (2)$$

式中 $p(f)$ 表示 $p(t')$ 的傅里叶变换。将 $R_n(t_k)$ 在 $t_k = 0$ 处进行泰勒展开, 有

$$s(f, t_k) = p(f) \sum_{n=1}^N A_n \cdot \exp \left[i \frac{4\pi(f_c + f)}{c} \left(r_n + \dot{r}_n t_k + \frac{1}{2} \ddot{r}_n t_k^2 + \phi_n(t_k) \right) \right] \quad (3)$$

式中 $r_n = R_n(0)$, $\dot{r}_n = \dot{R}_n(0)$, $\ddot{r}_n = \ddot{R}_n(0)$, \dots , $\phi_n(t_k)$ 为三阶以上的高阶项。由式(3)中的相位项可见, 距离频率 f 和方位时间 t_k 存在线性耦合(一阶项), 表征着目标的距离徙动, 二阶项主要表征距离弯曲, 三阶以上的高阶项表征着目标复杂运动(如晃动)产生的相位变化。当成像时间较长时, 三阶以上的高阶项造成的距离徙动影响不能忽略, 必须考虑补偿。

在 (f, t_k) 域进行KEYSTONE变换^[4], 即令

$$t_k = \left(\frac{f_c}{f + f_c} \right) \tau \quad (4)$$

有

$$S(f, \tau) = p(f) \sum_{n=1}^N A_n \exp \left[i \frac{4\pi}{c} (f_c + f) r_n + i \frac{4\pi}{c} \dot{r}_n f_c \tau \right] + i \frac{2\pi}{c} \dot{r}_n f_c \frac{1}{1 + f/f_c} + i \frac{4\pi}{c} (f + f_c) \phi_n \left(\frac{f_c \tau}{f + f_c} \right) \quad (5)$$

由式(5)可知, 通过 KEYSTONE 变换去除了运动目标的距离-多普勒线性耦合, 实现了其距离徙动校正。KEYSTONE 变换后, 针对可近似为一个刚体的地面运动目标(如车辆), 文献[4]在距离频率-方位时间域进行二阶和高阶相位估计, 对其补偿后可实现距离弯曲校正。这种方法本质上要求在距离向处理区间内的不同散射点具有相同的多普勒历程, 复杂周期性变化的距离弯曲情况和大尺寸船体上不同距离单元散射点多普勒历程不同的特点, 使其在这里直接应用遇到困难。

考虑到舰船目标的运动速度较低, 式(5)中与距离弯曲对应的二阶项主要是由 SAR 的运动产生的。设场景中心地面静止目标信号的调频率为 f_{rs} (通常为已知参数), 并根据式(5)的相位函数可构造出二阶相位函数 $\psi(f, \tau)$

$$\psi(f, \tau) = \pi f_{rs} \frac{\tau^2}{1 + f/f_c} \approx \frac{2\pi}{c} \ddot{r}_n f_c \frac{\tau^2}{1 + f/f_c} \quad (6)$$

用 $\psi(f, \tau)$ 对式(5)进行相位补偿, 可去除大部分二阶项影响。对 $s(f, \tau)$ 在距离频率 f 向做傅里叶反变换, 可获得经距离徙动和距离弯曲粗校正后的目标信号 $S_A(t', \tau)$, 除剩余的范围很小的距离弯曲和舰船晃动产生的散射点距离分辨单元跨越外, 此时大部分散射点已处于同一距离单元。

对信号 $S_A(t', \tau)$ 在距离向分块, 对每一块再用文献[4]提出的方法, 在距离频率-方位时间域进行剩余二阶相位和高阶相位估计, 对其补偿后可完成剩余距离徙动误差的校正, 并形成经精确距离徙动校正的目标信号 $S_B(t', \tau)$ 。尽管分块后形成的小距离处理区间内散射点的多普勒历程可能还有不同, 因此分块处理仍带有一定的统计意义, 但与整块处理相比, 显然分块处理对舰船目标距离徙动的校正精度较高。

结合 SAR 聚焦深度的概念, 以其作为参考在距离向分块进行距离徙动校正。针对 X 波段 0.5m 分辨率 SAR 的仿真表明, 当成像时间在 10s 左右, 船体晃动周期在 5s 左右, 对最大径向速度为 0.3m/s 的散射点形成的范围约为 2.5m 距离分辨单元跨越, 通常采用八阶左右的相位补偿即可实现精确的距离徙动校正, 而海面舰船产生的大信杂比信号, 也为本文方法的高阶相位估计和补偿提供了条件。

3 舰船目标成像

经过距离徙动校正后, 即可对舰船目标信号进行成像处理。对信号 $S(t', \tau)$ 在方位时间 τ 域做傅里叶变换, 在 (r, f_d) 域获得的目标图像为

$$I(r, f_d) = BT_s \sum_{n=1}^N A_n' \operatorname{sinc} \left[\frac{2\pi B}{c} (r - r_n) \right] \cdot \operatorname{sinc} \left[\pi T_s \left(f_d - \frac{2\dot{r}_n f_c}{c} \right) \right] \quad (7)$$

其中 B 为雷达发射信号带宽, T_s 为合成孔径时间, $A_n' = A_n \exp(i4\pi f_c r_c / c)$ 。

由于在距离频率-方位时间域进行的相位补偿精度总是有限的, 距离徙动校正后信号存在的剩余相位误差, 仍会造成式(7)图像一定程度的散焦, 本文考虑利用时频分析^[1,3,5]完成舰船目标成像。时频分析方法的成像效果在很大程度上取决于时频分布函数的性能, 一个理想的时频分布不仅应在时频域具有高的分辨率, 而且应可准确地反映信号的瞬时频率。常用的时频分布有短时傅里叶变换(STFT), Pseudo Wigner-Vill(PWV)分布等。为避免Wigner-Vill分布存在的交叉项干扰, 本文采用STFT解决舰船目标成像问题。

由于窗函数的影响, STFT 的时频分辨率与窗函数的宽度有关, 使用时需在时间分辨率和频率分辨率之间进行折衷, 其频率分辨率要比傅里叶变换低许多。与此同时, 为抑制不同分量信号的副瓣干扰, 通常还需选用副瓣电平较低的窗函数, 但这是以牺牲频率分辨率为代价的。文献[6]介绍了一种 SAR 图像副瓣抑制方法 CDA (Complex Dual Apodiza-

tion), 本文受文献[5]提出的组合时频分布思想启发, 提出了 STFT 和 CDA 处理相结合的时频分析成像方法, 直接在 (r, f_d) 域完成 CDA 处理, 在抑制干扰的同时, 保持了与均匀窗 STFT 对应的较高的频率分辨率, 其成像基本步骤如下:

(1) 采用均匀窗 $w_1(\tau)$ 计算不同距离单元信号 $s_B(t', \tau)$ 的 STFT 为

$$S_1(r, \tau, f_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_B(t', \tau_0) w_1^*(\tau_0 - \tau) e^{-j2\pi f_d \tau_0} d\tau_0 \quad (8)$$

式中*代表复数共轭。

(2) 采用函数窗 $w_2(\tau)$ (副瓣电平较低的海明窗或泰勒窗) 计算 $s_B(t', \tau)$ 的 STFT 为

$$S_2(r, \tau, f_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_B(t', \tau_0) w_2^*(\tau_0 - \tau) e^{-j2\pi f_d \tau_0} d\tau_0 \quad (9)$$

(3) 在任一 τ 时刻, 在 (r, f_d) 域分别对 $S_1(r, \tau, f_d)$ 和 $S_2(r, \tau, f_d)$ 用其各自的最大值进行归一化, 进行 CDA 处理后的图像为

$$I(r, f_d) = |\text{Ireal}(\tau, r, f_d) + i \cdot \text{Imag}(\tau, r, f_d)| \quad (10)$$

其中, 如果 $S_1(r, \tau, f_d)$ 的实部和 $S_2(r, \tau, f_d)$ 实部同号, 令 $\text{Ireal}(\tau, r, f_d)$ 为两者绝对值小者; 如果 $S_1(r, \tau, f_d)$ 的实部和 $S_2(r, \tau, f_d)$ 实部异号, 令 $\text{Ireal}(\tau, r, f_d)$ 为零。如果 $S_1(r, \tau, f_d)$ 的虚部和 $S_2(r, \tau, f_d)$ 虚部同号, 令 $\text{Imag}(\tau, r, f_d)$ 为两者绝对值小者; 如果 $S_1(r, \tau, f_d)$ 的虚部和 $S_2(r, \tau, f_d)$ 虚部异号, 令 $\text{Imag}(\tau, r, f_d)$ 为零。

本文直接在 (r, f_d) 域完成 CDA 处理并成像, 不会带来文献[5]在时-频 (r, f_d) 域完成 CDA 处理后, 成像时还需对信号幅度去除归一化的问题。

4 实际数据处理结果

本文处理的舰船目标实际数据来自一 X 波段 0.5m 高分辨率机载 SAR 系统, 分别处理了两条舰船目标船 1 和船 2, 该 SAR 系统工作于正侧视, 其斜距量化单元为 0.3m, 脉冲重复频率 PRF = 1500Hz, 方位向处理脉冲数为 16384, 数据对应的方位向持续时间约为 11s。

对船 1(船长约 60m, 斜距 11km)数据用第 2 节所述方法完成粗距离徙动校正, SAR 运动带来的影响基本去除(调频率 $f_{rs} = 25.6\text{Hz/s}$)。图 1 给出了船 1 在粗距离徙动校正后接近船尾处一个强散射点(第 50 个距离单元)信号的时频分布(PWV, 下图同), 图 2 给出了船头处一个强散射点(第 183 个距离单元)信号的时频分布, 从图 1 和图 2 可看出, 在 11s 的时间里, 散射点的多普勒频率是非线性时变的, 其变化范围大约 15Hz, 从该变化可以反映出舰船目标存在复杂的运动形式。继续利用本文第 2 节介绍的方法对船 1 进行精确的距离徙动校正, 船上第 50 和第 183 个距离单元散射点信号的时

频分布如图 3 和图 4 所示, 其多普勒频率变化范围得到极大缓解, 从而舰船复杂运动带来的距离徙动得到较好的校正。

对上述船 1 数据, 用本文方法完成距离徙动校正的情况如图 5 所示。图 5(上)为原始数据的距离徙动情况, 此船存在明显的走动; 图 5(中)为数据经 KEYSTONE 变换和距离弯曲粗校正后的结果, 从中可发现船体晃动造成的明显的散射点距离分辨单元跨越现象; 图 5(下)给出了该数据经距离向分块精确距离徙动校正后的结果。

由上述可见, 由于海浪的作用, 该船存在复杂的三维晃动^[2]。虽然, 通过本文方法将距离徙动影响基本解决, 但由图 3 和图 4 可见, 舰船目标在距离向的不同散射点多普勒历程还存在少量差异。图 6 给出了船 1 数据经距离徙动校正后, 沿方位向进行傅里叶变换在 (r, f_d) 域获得的成像结果, 成像时使用海明窗加权, 图像显示动态范围为 43dB。由图 6 可见, 由于少量残余的多普勒历程差异, 船体上一些散射点仍然存在少量的散焦现象。

利用基于 STFT 的时频分析方法处理船 1 经距离徙动校正后的数据, 在 $\tau=0$ 时刻获得的成像处理结果如图 7、图 8

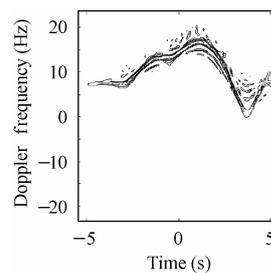


图 1 距离徙动粗校正后第 50 个距离单元信号的时频分布

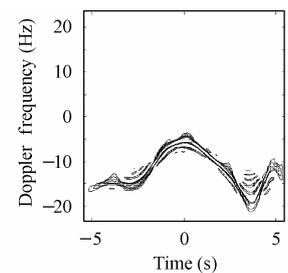


图 2 距离徙动粗校正后第 183 个距离单元信号的时频分布

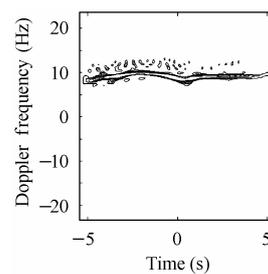


图 3 距离徙动精确校正后第 50 个距离单元信号的时频分布

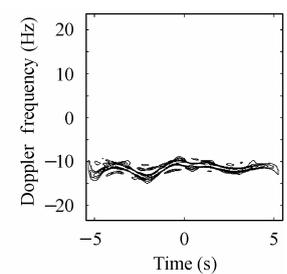


图 4 距离徙动精确校正后 183 个距离单元信号的时频分布

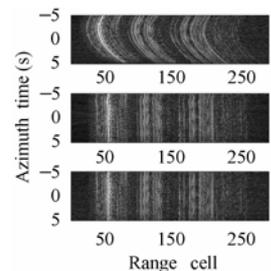


图 5 船 1 距离徙动校正情况

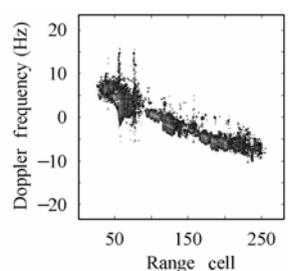


图 6 直接方位傅里叶变换成像结果

和图 9 所示, 图像显示动态范围都为 40dB。处理过程中取窗函数的宽度为信号长度的四分之一, 并利用均匀窗和海明窗进行 CDA 处理。显然, 采用均匀窗的图 7 在多普勒频率向上存在较大的副瓣干扰, 采用海明窗的图 8 多普勒频率分辨率较低, 而经 CDA 处理后图 9 的目标图像较为清晰。

上述船 1 实际数据在表现船体上不同散射点具有不同的多普勒历程和船体晃动造成的散射点距离分辨单元跨越现象方面非常具有代表性。对另一条船 2(船长约 100m, 斜距 11km, SAR 方位向调频率 $f_{rs} = 32.3\text{Hz/s}$) 数据进行精确距离徙动校正。对船 2 数据用基于 CDA 处理 STFT 方法在 $\tau = -4.64\text{s}$, $\tau = -2.06\text{s}$, $\tau = 3.95\text{s}$ 时刻获得的成像处理结果如图 10、图 11 和图 12 所示, 图像显示动态范围分别为 24 dB, 31dB, 24dB。船体成像轮廓清晰, 另外由图 10, 图 11 和图

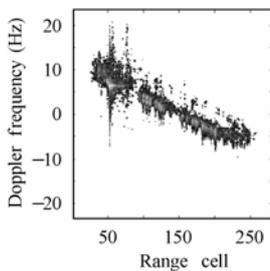


图 7 基于均匀窗 STFT 的成像结果

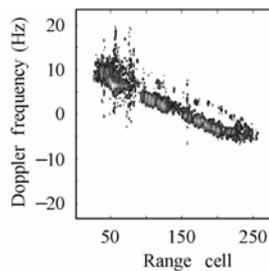


图 8 基于海明窗 STFT 的成像结果

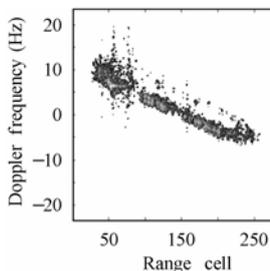


图 9 基于 CDA 处理 STFT 的成像结果

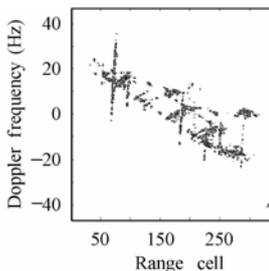


图 10 基于 CDA 处理 STFT 的成像结果(船 2, $\tau = -4.64\text{s}$)

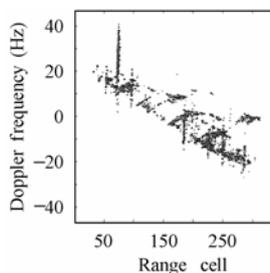


图 11 基于 CDA 处理 STFT 的成像结果(船 2, $\tau = -2.06\text{s}$)

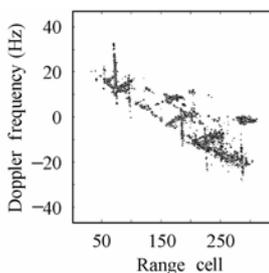


图 12 基于 CDA 处理 STFT 的成像结果(船 2, $\tau = 3.95\text{s}$)

12 可见, 船体在不同时刻的运动情况有所不同, 船上高度较高的一些散射点的多普勒频率大致以甲板线为中心变化, 上下或左右偏移。

5 结束语

本文研究了合成孔径成像时间较长情况下海面运动舰船目标的 SAR 成像问题。根据船体上不同距离单元散射点多普勒历程可能不同的特点, 采用粗校正和精校正相结合的方法在距离频率-方位时间域进行二阶和高阶相位补偿, 完成运动舰船目标的距离徙动校正。与此同时, 提出了 STFT 和 CDA 处理相结合的时频分析成像方法。实际数据的处理结果表明了该方法的有效性。

参考文献

- [1] Hajduch G, Le Caillec J M, Garello R. Airborne high-resolution ISAR imaging of ship targets at sea. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 40(1): 378 - 384.
- [2] Pastina D, Montanari A, Arile A. Motion estimation and optimum time selection for ship ISAR imaging. 2003 IEEE Radar Confernce, 2003: 7 - 14.
- [3] Chen V C, Hao Ling. Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis [M]. London: Artech House Inc. 2002.
- [4] Perry R P, Dipietro R C, Fante R L. SAR imaging of moving targets. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(1): 188 - 199.
- [5] 李道京, 宋祖勋, 彭进业, 俞卞章. 基于 KEYSTONE 变换和时频分析的 ISAR 成像研究. 西北大学学报(自然科学网络版), 2003, 10(4): 1 - 6.
- [6] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms[M]. London: Artech House Inc., 1995: 507 - 529.

汤立波: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达运动目标检测与成像. E-mail: libo_tang@126.com.

李道京: 男, 1964 年生, 博士后, 研究方向为雷达系统和雷达信号处理.

吴一戎: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为信号与信息处理.

丁赤飏: 男, 1969 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为信号与信息处理.