

# 一种直升机的舰船 Dechirp 实测数据 SAR 成像方法

李亚超 周峰 邢孟道 保铮

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 直升机由于飞行不稳将会给运动目标成像带来很大的误差,尤其是对复杂运动舰船的成像。该文提出了一种基于利用运动补偿并两次利用广义二阶 keystone 变换同时结合利用孤立的散射点进行 WVD 变换估计多普勒参数的方法来分别消除距离弯曲和距离走动并最终对舰船成像。文中对算法做了详细的推导证明,并最终得到了良好的成像结果。最后用 3 个运动点目标的仿真数据和 dechirp 实测舰船数据来证明该方法有效。

**关键词:** Dechirp; 广义 keystone 变换; WVD; 孤立的散射点

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)08-1794-05

## An Effective Method for Ship Dechirp Data Imaging in Helicopter SAR System

Li Ya-chao Zhou Feng Xing Meng-dao Bao Zheng

(National Key Lab. of Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In view of unsteadily flying, the helicopter brings about great errors to moving targets imaging, especially SAR imaging of moving ship. So this paper shows an effective method based on an idea that uses motion compensation, general second-step keystone transform twice and at the same time, finds an isolated point and adopts WVD transform to estimate Doppler parameters for removing range walk and curvature. And what is more, the detailed deductions are given in this paper. Finally, the SAR image of moving ship is acquired in the azimuth frequency field. The simulation results of three moving point-targets and the imaging result of real ship data confirm this method.

**Key words:** Dechirp; General keystone transform; WVD; Isolated point

### 1 引言

近年来,国内外就合成孔径雷达对运动目标的检测和成像<sup>[1,2]</sup>的研究已有许多成果。但大部分的文献所针对的是地面运动目标运动轨迹弯曲几乎可以忽略的情况下的成像,而对于低频段(如 L,P 波段)中的运动目标或复杂运动的舰船目标而言,由于比较大的距离弯曲的影响,从而加大了对运动目标参数估计和成像的难度,尤其如舰船所造成严重距离徙动的影响。当然在国内对舰船目标实测数据的成像也早有研究,如文献[3]中,是把全孔径分成许多的子孔径,这样在每个孔径中就可以忽略距离走动和弯曲的影响而单独成像,但在最后的图形拼接时由于距离徙动的存在将使各个子孔径的图像在距离向上会有形变给图形拼接带来困难;文献[4]是结合 SAR 和 ISAR 的体制共同成像的,对于地面运动目标的成像不适用;而对于文献[5]来说,如果弯曲量主要由运动目标自身产生的话,成像和相位误差估计都会有比较大的误差。然而,对于静止场景而言,用传统的方法可以去除静止场景的弯曲量,但对于运动目标自身弯曲的去除就无能为力

了,所以必须把运动目标提取出来成像。当然调频率的估计对成像来说非常重要,而弯曲又严重影响着调频率的估计;所以本文基于以上的问题,提出了一种基于利用运动补偿和广义二阶 keystone 变换去弯曲和走动并结合 WVD 估计参数联合成像的方法。该方法是完全利用 SAR 体制成像,可用于子孔径和全孔径成像,并且适用于地面场景的动目标成像。在本文最后的仿真数据和实测数据的成像中证明了该方法的有效性。

### 2 回波模型

在文献[2,6]中都对运动目标的回波模型有比较详细的说明,这里就只给出结果,如图 1 所示,图中  $v_c, v_r, a_c$  和  $a_r$  分别是方位向和径向的速度和加速度。 $R_0$  为雷达在  $t_m = 0$  时与目标的最短距离,故雷达到运动目标的瞬时斜距为

$$R(t_m) = R_0 - v_r t_m + ((v - v_c)^2 - R_0 a_r) \frac{t_m^2}{2R_0} \quad (1)$$

当然,为了得到不同的参数,也可以使用直角坐标系,如图 2 所示并表示瞬时斜距为

$$R(t_m) \approx R_0 + \frac{Yv_y}{R_0} t_m + \left\{ -\frac{(Yv_y)^2}{2R_0^3} + \frac{(v - v_x)^2 + v_y^2}{2R_0} \right\} t_m^2 \quad (2)$$

2005-11-28 收到, 2006-05-22 改回

国家自然科学基金(60502044)和微波成像重点实验室基金(51442020404DZ0102)资助课题



$$S_{if_r}(f_r, t_m) = A T_p \text{sinc} \left[ T_p \left( f_r + 2 \frac{\gamma}{c} R_{\Delta} \right) \right] \exp \left( -j \frac{4\pi}{c} f_c R_{\Delta} \right) \cdot \exp \left( -j \frac{4\pi\gamma}{c^2} R_{\Delta}^2 \right) \exp \left( -j \frac{4\pi f_r}{c} R_{\Delta} \right) \quad (14)$$

由文献[10]可知只要补偿  $f_r = -2(\gamma/c)R_{\Delta}$  处的相位即可。而式(14)的第二个指数项为剩余视频相位(RVP)，它会使得多普勒有少许的变化，必须加以补偿掉；而第 3 个指数项为回波包络“斜置”项，也要加以补偿掉，故补偿因子为

$$S_c(f_r) = \exp(-j\pi f_r^2 / \gamma) \quad (15)$$

故用式(14)乘以式(15)得到

$$S_{if_r}(f_r, t_m) = A T_p \text{sinc} \left[ T_p \left( f_r + 2 \frac{\gamma}{c} R_{\Delta} \right) \right] \exp \left( -j \frac{4\pi f_c}{c} R_{\Delta} \right) \quad (16)$$

对 RVP 和包络斜置加以补偿后再对式(16)做 IFFT 变换到时域可得

$$S_{if_r}(t', t_m) = \text{Arect}(t'/T_p) \exp(j\Phi_1) \exp(j\Phi_2) \quad (17)$$

其中

$$t' = \tilde{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}$$

$$\Phi_1 = -\frac{4\pi\gamma}{c} \left( t' + \frac{f_c}{\gamma} \right) R_i(t_m)$$

$$\Phi_2 = \frac{4\pi\gamma}{c} \left( t' + \frac{f_c}{\gamma} \right) R_{\text{ref}}$$

从式(17)可以看出引起距离徙动的主要是第 1 个指数项，而第 2 个指数项会使图像在距离向上移动，但并不影响成像。所以在后面的分析中，只考虑第 1 个指数项，结合式(3)可写为

$$\Phi_1 = -\frac{4\pi}{c} (\gamma t' + f_c) (R_i + R_i' t_m + R_i'' t_m^2) \quad (18)$$

虽然 dechirp 数据的成像同式(4)中的回波数据成像不一样，但是做广义 keystone 变换去走动和弯曲的思路是相同的。只是插值的表达式有些变化，故写为

$$t_m = \left( \frac{f_c}{\gamma t' + f_c} \right)^{1/2} \tau_m \quad (19)$$

式(18)经过式(19)的广义 keystone 变换插值后得到

$$\Phi_1 = -\frac{4\pi}{c} R_i (\gamma t' + f_c) - \frac{4\pi}{c} R_i' (\gamma t' + f_c)^{1/2} f_c^{1/2} \tau_m - \frac{4\pi}{c} R_i'' f_c \tau_m^2 \quad (20)$$

从式(20)可以知道，此时的距离向的弯曲已经去除了，而且距离走动的斜率也变为原来的一半，这都有利于做 WVD 变换分析调频率。由式(20)可知道这时如果再对它进行广义 keystone 变换就可以去走动，但此时由于有二次相位误差故必须补偿掉。这时可以取出孤立点的某个距离单元的数据做 WVD，在时间-频率面上会形成一条斜线，同时可以得到线性调频信号的调频率  $\gamma_a$  (即方位向的调频率)，而  $\gamma_a$  和  $R_i''$  的关系为

$$R_i'' = -\lambda \gamma_a / 4 \quad (21)$$

其中  $\lambda$  为载波的波长，这样就可以得到去除二次相位误差的

函数为

$$H1 = \exp \left( j \frac{4\pi}{c} R_i'' f_c \tau_m^2 \right) \quad (22)$$

用式(17)经过广义二阶 keystone 变换后的数据乘以式(22)，则式(20)的相位变为

$$\Phi_1' = -\frac{4\pi}{c} R_i (\gamma t' + f_c) - \frac{4\pi}{c} R_i' (\gamma t' + f_c)^{1/2} f_c^{1/2} \tau_m \quad (23)$$

这时再进行一次广义二阶 keystone 变换，即令  $\tau_m =$

$\left( \frac{f_c}{\gamma t' + f_c} \right)^{1/2} \tau'_m$ ，因此式(17)变为

$$S_{if_r}(t', t_m) = \text{Arect}(t'/T_p) \exp \left( -j \frac{4\pi}{c} R_i (\gamma t' + f_c) \right) \cdot \exp \left( -j \frac{4\pi}{c} R_i' f_c \tau'_m \right) \exp \left( j \frac{4\pi\gamma}{c} \left( t' + \frac{f_c}{\gamma} \right) R_{\text{ref}} \right) \quad (24)$$

从式(24)可以看出，距离走动和弯曲都已补偿掉了，故对距离和方位都做 FFT 可以得到成像结果为

$$S(f_r, f_a) = A T_p T_m \text{sinc} \left[ T_p \left( f_r + \frac{2\gamma}{c} (R_i - R_{\text{ref}}) \right) \right] \cdot \text{sinc} \left[ T_m \left( f_a + \frac{2f_c}{c} R_i' \right) \right] \exp \left( -j \frac{4\pi f_c}{c} R_i \right) \cdot \exp \left( j \frac{4\pi f_c}{c} R_{\text{ref}} \right) \quad (25)$$

式(25)中的  $R_i$  和  $R_i'$  分别是式(3)中的常数项和一次项的系数，可见它们与运动目标自身的速度和加速度有关， $T_m$  为合成孔径时间；同时第 1 和第 2 个指数项都是常数，可以不加考虑；最后目标在坐标  $\left( -\frac{2\gamma}{c} (R_i - R_{\text{ref}}), -\frac{2f_c}{c} R_i' \right)$  成像。

要在静止背景中成像就必须把位置补偿回去，实际上可以在二维时域估计多普勒中心并结合式(21)和部分惯导数据根据文献[13]的方法计算出  $Y, v_c$  或  $v_x, v_r$  或  $v_y$ ，从而把运动目标成像在静止的场景中。综上所述，整个算法流程如图 3 所示。实际上，由于要做两次 keystone 插值使得运算效率会比较低，但文献[14]中介绍了一种基于频域的 SFT-keystone 插值方法，这种插值并不会影响动目标的成像质量，而且提高了运算效率，所以整个算法的成像时间并不太长。

图 3 中并没有提到静止场景的方位压缩问题，由于静止场景成像算法大家都很熟悉，因此在这里没有提出来。当然，

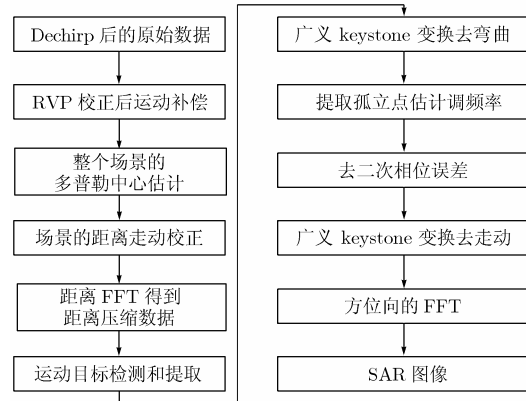


图 3 解线调频后的数据运动目标的成像流程图

在图 3 中,二次相位误差参数的估计如不用时频分析方法也可用文献[8]中所提出的几种方法估计,如 ADSM(Average Dominate Scatter Method)等。

实际上本文并没有详细地说明有关静止场景成像的方法,因此具体的成像方法参考文献[10]。本文的运动目标成像也是在已经对静止场景成像后进行的。

对于 keystone 变换来说方位模糊是不实用的,因此必须解模糊;而解模糊和 keystone 具体实现的问题分别在文献[14]和文献[15]中有详细的说明,在这里就不再说了。

调频率的估计是非常重要的,实际上也可用子孔径 MD 的方法来估计子孔径调频率,再拟合得到全孔径的调频率,并用于成像。

### 6 运动目标成像仿真

#### 6.1 点目标仿真

假设有 3 个点目标其参数为:  $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ ,  $\lambda = 0.2\text{m}$ ,  $B = 300\text{MHz}$ ,  $F_s = 320\text{MHz}$ ,  $v = 120\text{m/s}$  (载机速度),  $H = 4000\text{m}$  (飞行高度),  $\text{PRF} = 500\text{Hz}$ ,  $D = 2\text{m}$  (天线长度),  $T_p = 0.5\mu\text{s}$  (脉冲宽度),  $W_g = 40\text{m}$  (成像带宽度),  $R_s = 7000\text{m}$  (斜距), 3 个点目标的速度分别为  $v_{x1} = 3\text{m/s}$ ,  $v_{y1} = 3\text{m/s}$ ,  $v_{x2} = 2\text{m/s}$ ,  $v_{y2} = -4\text{m/s}$  和  $v_{x3} = 1\text{m/s}$ ,  $v_{y3} = 5\text{m/s}$ , 其初始坐标位置分别为  $(-L/4, Y - 8, 0)$ ,  $(0, Y + 15, 0)$  和  $(0, Y, 0)$ , 其中  $L$  是合成孔径长度而  $Y$  是场景条带中心到飞行航线的垂直距离,按上述成像方法其结果如图 4。

#### 6.2 实测数据成像

实测数据参数是  $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ ,  $\text{PRF} = 500\text{Hz}$ ,  $F_s = 100\text{MHz}$ ,  $T_p = 40\mu\text{s}$ ,  $v = 55\text{m/s}$ ,  $\lambda = 0.01948\text{m}$ ,  $B = 80\text{MHz}$ ,  $R_0 = 8000\text{m}$  (成像带最近边缘到飞行航线的垂直斜距)。其成像结果如图 5 所示(该数据原本是  $8192 \times 8192$  的数据,但在距离压缩后把舰船的运动轨迹提取了出来进行成像故只有  $80 \times 4096$  的数据量):

从图 5(d)可知,调频率的估计是较准确的,方位压缩后的峰峰旁瓣比都在  $40\text{dB}$  左右;图 5(c)中的舰船良好的图像也证明了这一点。从实测数据和仿真数据成像可知本文所提出的方法是实际可行的,对静止场景的运动目标成像也是可行的。由于实测数据是 dechirp 数据,故距离向压缩只要在 RVP 校正后做 FFT 即可,如图 5(a)所示。

### 7 结束语

针对如舰船这样运动目标所形成的距离向弯曲和走动的成像,本文先用运动补偿的方法去除了由于平台不稳所造成的误差,后利用广义二阶 keystone 变换和提取孤立散射点做 WVD 变换来估计多普勒参数的方法去除舰船的弯曲和走动并最终对舰船成像。而实际上对于多普勒参数也可以用通常的参数估计方法来做,如用子孔径 MD 方法来估计调频

率等。本文最后通过点目标的仿真和实测 dechirp 舰船数据证明了该方法是有效的。

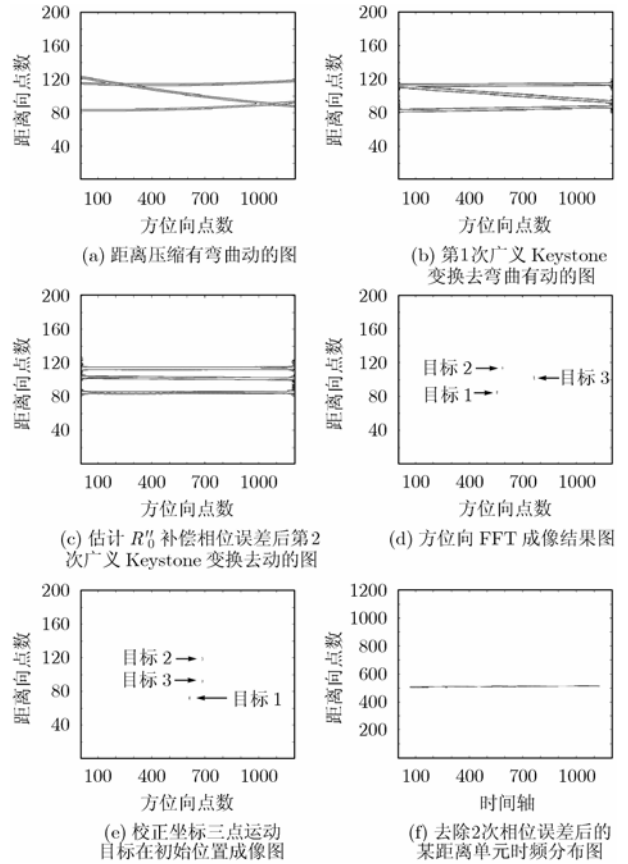


图 4 利用广义 keystone 和 WVD 对 3 点运动目标成像图

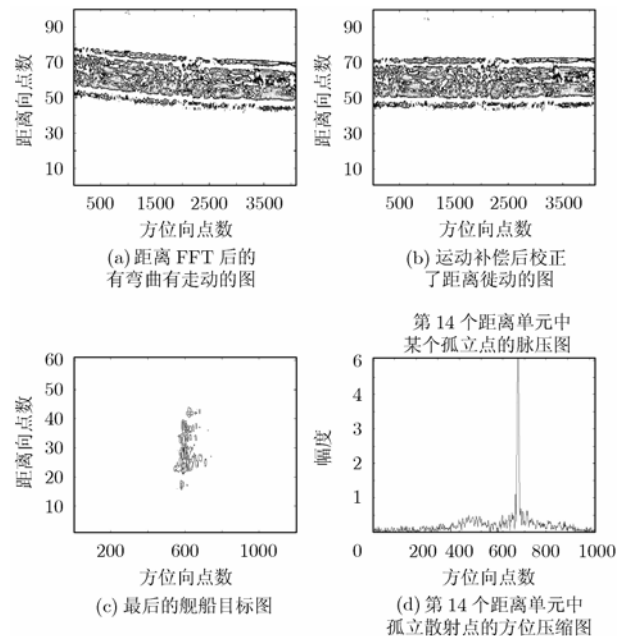


图 5 实测舰船目标成像结果

### 参考文献

[1] Sparr T. Moving target motion estimation and focusing in SAR images[C]. International Radar Conference, Yantai,

- China, IEEE, 9-12 May, 2005: 290-294.
- [2] Qu Chang-wen, He You, Su Feng, and Huang Yong. SAR moving targets detection based on the chirp-Fourier transform[C]. International Radar Conference, Yantai, China, IEEE, 9-12 May, 2005: 802-805.
- [3] 陈仁元, 张长耀, 邓海涛, 王燕宇. 直升机合成孔径雷达对海面动目标成像[C]. 中国合成孔径雷达会议论文集, 合肥, 2003, 12, 1-4: 264-267.
- [4] 李士国, 单荣光, 储晓彬, 倪晋麟. 基于 SAR/ISAR 的机载雷达舰船成像[J]. 信号处理, 2000, 16(2): 151-155.
- [5] Tang Li-bo, Li Dao-jing, Hong Wen, and Cao Fang. High resolution SAR imaging of moving ships[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'05 Proceedings, IEEE International, Beijing, P.R.China, 25-29 July, 2005: 3329-3332.
- [6] 李杰, 向敬成, 黄顺吉. 合成孔径雷达慢运动目标成像处理的研究[J]. 电子科技大学学报, 1995, 24(2): 119-125.
- [7] Shun-Sheng Zhang, Tao Zeng, Teg Long, and Hai-Peng Yuan. Dim target detection based on keystone transform[J]. International Radar Conference, Yantai, China, IEEE, 9-12 May, 2005: 889-894.
- [8] Perry R P. SAR imaging of moving targets[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(1): 188-200.
- [9] 盛蔚, 毛士艺. 基于 keystone 变换的地面运动目标检测研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(11): 2-5.  
Sheng Wei and Mao Shi-yi. Ground moving target detection with an SAR system based on keystone transform. *Systems Engineering and Electronics*, 2002, 24(11): 2-5.
- [10] 保铮, 邢孟道, 王彤编著. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005, 第 2,5,6 章.
- [11] 张贤达, 保铮编著. 非平稳信号的分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998, 第 2,3 章.
- [12] L Cohen. Time-frequency distributions-review[J]. *Proc. IEEE*, 1978, 77(1): 86-91.
- [13] 盛蔚, 毛士艺. 一种合成孔径雷达对地面运动目标成像和精确定位的算法[J]. 电子与信息学报. 2004, 26(4): 598-606.  
Sheng Wei and Mao Shi-yi. An effective method for ground moving target imaging and location in SAR system. *Journal of Electronics & Information Technology*. 2004, 26(4): 598-606.
- [14] 邢孟道, 保铮, 郑义明, 冯大政. 适合于大型平稳和机动目标的成像算法[J]. 信号处理, 2001, 27(3): 43-45, 49.
- [15] 陈文驰, 邢孟道. 基于 keystone 变换的多目标 ISAR 成像算法[J]. 现代雷达. 2005, 17(1): 47-55.
- 李亚超: 男, 1981 年生, 博士生, 从事雷达信号处理、SAR 成像方面及动目标检测和成像的研究工作.
- 周 峰: 男, 1980 年生, 博士生, 从事雷达信号处理、SAR 抗干扰研究、SAR 成像方面及动目标检测和成像的研究工作.
- 邢孟道: 男, 1975 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达成像和目标识别, 主持自然科学基金重点项目、国防预研、跨行业预研基金、横向合作等十多项, 已发表论文 40 多篇.
- 保 铮: 男, 1927 年生, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 主要研究领域为雷达信号处理、SAR 成像处理、空时二维信号处理、动目标检测及成像和目标识别等.