

文章编号: 1007-4619 (2002)06-0490-06

# 一种基于曲线 SAR 的三维目标特征提取与自聚焦新算法

吴仁彪, 苏志刚, 刘家学, 刘杰

(中国民用航空学院 通信与信息处理研究所, 天津 300300)

**摘要:** 曲线合成孔径雷达(Curvilinear Synthetic Aperture Radar, 简称曲线 SAR)是一种新的三维成像模式。通过让载机作曲线飞行, 曲线 SAR 系统能同时在方位维和高度维形成大的合成孔径。本文提出一种曲线 SAR 的三维目标特征提取和自聚焦新方法。新方法是建立在一种灵活的接收数据模型之上的参数化的新方法。仿真实验证明了所提方法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 曲线合成孔径雷达; 运动补偿; 特征提取

**中图分类号:** TP751.1/TP722.6 **文献标识码:** A

## 1 引言

通过发射大带宽信号和利用雷达与目标间的相对运动, 合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, 简称 SAR)可以对感兴趣的目標或场景进行高分辨率成像。目前, SAR 成像技术已被广泛地应用到许多军事与民用领域<sup>[1]</sup>, 如: 战场侦察与警戒、环境监测和城市规划等。世界上现有 30 多个 SAR 系统已投入使用<sup>[1]</sup>。然而, 其中大多数只具有二维成像能力。在实践中, 常常有许多应用需要进行三维特征提取(如自动目标识别)。目标的三维特征包括目标的雷达散射截面积(Radar Cross Section, 简称 RCS)、目标的二维位置和高度。

仅有少数文章讨论了对目标的三维特征提取问题<sup>[2-4]</sup>。文献[2]探讨了如何利用干涉 SAR 系统进行目标的三维特征提取。干涉 SAR 是利用一对垂直放置的天线来获得相干的平行测量孔径。但是干涉 SAR 系统仅有测高能力而不具备高度方向上的分辨能力, 此外测高还涉及麻烦的相位展开问题, 它只能称为 2.5 维成像系统。文献[3]提出了一种利用曲线 SAR 提取目标三维特征的新思路。通过载

机作曲线飞行, 曲线 SAR 能实现真正意义上的三维成像。曲线 SAR 还避开干涉 SAR 中测高时遇到的麻烦的相应展开问题。对于机载曲线 SAR 系统, 由于大气的扰动和平台位置的不确定性导致雷达相对场景中心的位置(参考点)不能精确测定, 因此必须估计出运动误差(包括孔径误差(对应飞行轨迹的不确定性)和相位误差(对应参考点到雷达距离的不确定性))并将其补偿掉。然而, 在文献[3,4]中均没有涉及运动补偿问题。

曲线 SAR 中的合成孔径类似于稀布阵列, 用常规方法直接进行成像将有很高的副瓣导致图像失真, 由此提取的特征不能反映目标的真实情况。因此曲线 SAR 中的特征提取也比一般 SAR 要困难得多。

吴仁彪等人提出了适应于常规二维 SAR 和 ISAR 成像的稳健的自聚焦算法<sup>[5,6]</sup>。在本文中, 我们将扩展此方法, 使得在曲线 SAR 中可以同时完成自聚焦和三维目标特征提取。新方法可以显著改善目标特征的估计精度。

## 2 数据模型与问题的描述

目标三维特征的提取需要在距离上、方位上和

收稿日期: 2002-05-01; 修订日期: 2002-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(69902009), 国家 863 高技术计划项目(863-308-19-01-(3))资助课题。

作者简介: 吴仁彪(1966—), 男, 先后于 1988 年 7 月和 1991 年 1 月在西北工业大学获无线电通信专业学士学位和信号、电路与系统专业硕士学位。1994 年 4 月在西安电子科技大学获信号与信息处理专业博士学位。现为中国民航学院空中交通管理学院院长, 天津市特级教授, 博士生导师。主要研究领域包括合成孔径雷达成像, 自适应阵列, 谱估计, 空时自适应处理等。发表论文 60 余篇。

高度上均为高分辨率。常规测距雷达的方位和高度分辨率受限于天线的波束宽度。对于机载或星载系统,窄天线波束所要求的天线尺寸过大而无法安置在飞机或卫星上。聚束式曲线 SAR 通过接收不同观察角的相干回波信号避免了这种需求。通过对回波信号的有效处理,我们能够同时获得在方位和高度上的高分辨率。为了在距离上获得高分辨率,雷达必须发射大带宽信号,通常为线性调频 Chirp 信号<sup>[7,8]</sup>。规一化的 Chirp 脉冲可写为:

$$s(t) = \exp\{-j(2\pi f_0 t + \gamma t^2)\} \quad |t| \leq T_0/2 \quad (1)$$

其中  $f_0$  表示载波频率,  $2\gamma$  表示线性调频率,  $T_0$  表示信号脉宽。

曲线 SAR 系统的参考坐标系如图 1。假设曲线孔径包括  $M$  个不同的观测角,并用  $\left\{ \begin{matrix} \theta_m & \phi_m \end{matrix} \right\}_{m=1}^M$  表示  $M$  个雷达观测角的方位角和下视角。那么,经过 Dechirp 处理<sup>[8]</sup>后,一次仅次于  $(x, y, z)$  处的散射点在第  $m$  个观测角的信号形式为<sup>[4]</sup>

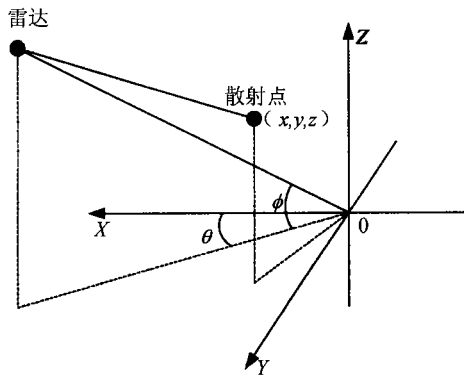


图 1 参考坐标系

Fig.1 Data collection geometry

$$d(n, \hat{\theta}_m, \hat{\phi}_m) \approx \delta_{x,y,z} \exp\{j[\tilde{x} \hat{t}_x(n) + \tilde{y} \hat{t}_y(n) + \tilde{z} \hat{t}_z(n)]\}, \quad n = 0, 1, \dots, (N-1) \quad (2)$$

其中  $\delta_{x,y,z}$  表示散射点  $(x, y, z)$  的 RCS,  $N$  表示每个观测角的有效时间采样数,

$$\hat{t}_x(n) = -\frac{4(\pi f_0 - \gamma \tau_0 + \gamma t_n)}{c} \cos(\hat{\theta}_m) \cos(\hat{\phi}_m) \quad (3)$$

$$\hat{t}_y(n) = -\frac{4(\pi f_0 - \gamma \tau_0 + \gamma t_n)}{c} \sin(\hat{\theta}_m) \cos(\hat{\phi}_m) \quad (4)$$

$$\hat{t}_z(n) = -\frac{4(\pi f_0 - \gamma \tau_0 + \gamma t_n)}{c} \sin(\hat{\phi}_m) \quad (5)$$

$$\tilde{x} = x + \frac{-(y^2 + z^2) \cos \phi_0 + 2xz \sin \phi_0}{2R_0} \quad (6)$$

$$y = y + \frac{xy \cos \phi_0 + yz \sin \phi_0}{R_0} \quad (7)$$

$$z = z - \frac{(x^2 + y^2) \sin \phi_0}{2R_0} \quad (8)$$

$\tau_0$  表示场景中心(参考点)的延迟,  $t_n$  为时间采样。则(6)–(8)式可以看出,当雷达与场景中心的距离足够大(满足远场假设)时,  $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$  接近真实位置  $(x, y, z)$ 。

由(2)式可知,  $d(n, \hat{\theta}_m, \hat{\phi}_m)$  是一个三维复正弦波信号。当目标由多散射点组成时, (2)式中的  $d(n, \hat{\theta}_m, \hat{\phi}_m)$  将为多个正弦波和的形式。实际中的曲线 SAR 系统获得的信号可描述为<sup>[4]</sup>

$$y(n, m) = z(n, m) + e(n, m), \quad n = 0, 1, \dots, (N-1), \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

式中,  $e(n, m)$  表示噪声与杂波,

$$z(n, m) = \sum_{k=1}^K \alpha_k \times \exp\{j2\pi[f_k \hat{t}_x(n) + \tilde{f}_k \hat{t}_y(n) + \tilde{f}_k \hat{t}_z(n)]\} \quad (10)$$

其中  $K$  为目标中散射点的数目,  $\alpha_k$  为第  $k$  个散射点的复幅度(正比于该点的 RCS)。

和常规 SAR 一样,由于相对位置的不确定性,导致孔径中存在相位误差  $\{\eta_m\}_{m=1}^M$ 。此外,由于曲线飞行轨迹不能精确设定,  $\{\hat{\theta}_m, \hat{\phi}_m\}_{m=1}^M$  也不能精确获得,存在扰动  $\{\Delta\theta_m, \Delta\phi_m\}_{m=1}^M$ 。定义  $\theta_m = \hat{\theta}_m + \Delta\theta_m$  和  $\phi_m = \hat{\phi}_m + \Delta\phi_m$ 。那么接收信号可写为

$$y(n, m) = x(n, m) + e(n, m), \quad n = 0, 1, \dots, (N-1), \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (11)$$

式中

$$x(n, m) = \left\{ \sum_{k=1}^K \alpha_k \exp\{j2\pi[f_k \hat{t}_x(n) + \tilde{f}_k \hat{t}_y(n) + \tilde{f}_k \hat{t}_z(n)]\} \right\} \times \exp\{j\eta_m\} \quad (12)$$

其中  $\hat{t}_x(n)$ ,  $\hat{t}_y(n)$  和  $\hat{t}_z(n)$  与  $\hat{t}_x(n)$ ,  $\hat{t}_y(n)$  和  $\hat{t}_z(n)$  形式相同,只是  $\{\hat{\theta}_m, \hat{\phi}_m\}_{m=1}^M$  被替换为  $\{\theta_m, \phi_m\}_{m=1}^M$ 。

现在,我们所感兴趣的问题是如何由  $y(n, m)$  中估计出  $\{\alpha_k, f_k, \tilde{f}_k, \tilde{f}_k\}_{k=1}^K$  (对应目标三维特征)和  $\{\theta_m, \phi_m, \eta_m\}_{m=1}^M$ 。

### 3 新方法

$\{\alpha_k, f_k, \tilde{f}_k, \bar{f}_k\}_{k=1}^K$  和  $\{\theta_m, \phi_m, \eta_m\}_{m=1}^M$  的估值  $\{\hat{\alpha}_k, \hat{f}_k, \hat{\tilde{f}}_k, \hat{\bar{f}}_k\}_{k=1}^K$  和  $\{\hat{\theta}_m, \hat{\phi}_m, \hat{\eta}_m\}_{m=1}^M$  可通过使(13)式非线性最小二乘代价函数。

$$C(\{\alpha_k, f_k, \tilde{f}_k, \bar{f}_k\}_{k=1}^K, \{\theta_m, \phi_m, \eta_m\}_{m=1}^M) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{N-1} |y(n, m) - x(n, m)|^2 \quad (13)$$

的最小化来获得。如果噪声  $e(n, m)$  是零均值高斯白噪声, 则未知参数的非线性最小二乘估计与参数的最大似然是估计一致的。如果噪声是有色的, 非线性最小二乘估计不再是参数的最大似然估计, 但其仍具有很好的统计性能<sup>[9]</sup>。(13)式的最小化问题是一个十分复杂的优化问题。下面我们将给出一种能够有效地对(13)进行最小化的方法。在说明我们的方法之前, 首先做如下准备。

#### 3.1 孔径误差估计

首先假设目标特征估计  $\{\hat{\alpha}_k, \hat{f}_k, \hat{\tilde{f}}_k, \hat{\bar{f}}_k\}_{k=1}^{\bar{K}}$  ( $\bar{K}$  表示中间散射点的数目,  $\bar{K} \leq K$ ) 和相位误差估计  $\{\hat{\eta}_m\}_{m=1}^M$  已知。那么  $\tilde{\theta}_m$  和  $\tilde{\phi}_m (m = 1, 2, \dots, M)$  可通过根据  $\theta_m$  和  $\phi_m$  最小化(14)式的  $C_m$  来获得。

$$C_m(\theta_m, \phi_m) = \sum_{n=0}^{N-1} |y_1(n, m) - z_1(n, m)|^2, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (14)$$

式中,  $z_1(n, m)$  与(10)式的  $z(n, m)$  具有相同的形式, 只是  $\{\alpha_k, f_k, \tilde{f}_k, \bar{f}_k\}_{k=1}^K$  被替换为  $\{\hat{\alpha}_k, \hat{f}_k, \hat{\tilde{f}}_k, \hat{\bar{f}}_k\}_{k=1}^{\bar{K}}$ ,  $y_1(n, m)$  表示经过相位误差补偿后的接收数据, 其形式为

$$y_1(n, m) = y(n, m) \exp\{-j\hat{\eta}_m\}, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (15)$$

当在方位上和下视角上均存在误差时, 可以通过迭代的方法估计  $\theta_m$  和  $\phi_m$ , 即交替地固定  $\theta_m$  的估计  $\hat{\theta}_m$  针对  $\phi_m$  最小化  $C_m$  和固定  $\phi_m$  的估计  $\hat{\phi}_m$  针对  $\theta_m$  最小化  $C_m$ , 直到“实际收敛”。在交替最小化方法中的“实际收敛”是根据代价函数  $C_m$  的相对变化量大小来确定的。

#### 3.2 相位误差估计

再设计目标特征估计  $\{\hat{\alpha}_k, \hat{f}_k, \hat{\tilde{f}}_k, \hat{\bar{f}}_k\}_{k=1}^{\bar{K}}$  和孔径估计  $\{\hat{\theta}_m, \hat{\phi}_m\}_{m=1}^M$  给定。相位误差估计  $\{\hat{\eta}_m\}_{m=1}^M$  可由下式给出。

$$\hat{\eta}_m = \text{angle}\left(\sum_{n=0}^{N-1} z_2^*(n, m) \cdot y(n, m)\right) \quad (16)$$

式中,  $(\cdot)^*$  表示复共轭,

$$z_2(n, m) = \sum_{k=1}^{\bar{K}} \tilde{\alpha}_k \exp\{j2\pi[\hat{f}_k \hat{t}_x(n) + \hat{\tilde{f}}_k \hat{t}_y(n) + \hat{\bar{f}}_k \hat{t}_z(n)]\} \quad (17)$$

其中  $\hat{t}_x(n), \hat{t}_y(n)$  和  $\hat{t}_z(n)$  分别与  $t_x(n), t_y(n)$  和  $t_z(n)$ , 具有相同的形式, 只是  $\{\theta_m, \phi_m\}_{m=1}^M$  被替换为  $\{\hat{\theta}_m, \hat{\phi}_m\}_{m=1}^M$ 。

#### 3.3 特征提取

已知运动误差估计  $\{\hat{\theta}_m, \hat{\phi}_m, \hat{\eta}_m\}_{m=1}^M$ , 原来的问题就转变为一个单纯的三维目标特征提取问题。三维目标特征  $\{\alpha_k, f_k, \tilde{f}_k, \bar{f}_k\}_{k=1}^K$  的估计  $\{\hat{\alpha}_k, \hat{f}_k, \hat{\tilde{f}}_k, \hat{\bar{f}}_k\}_{k=1}^K$  可用有效的 RELAX 算法<sup>[4]</sup> 获得。

#### 3.4 新方法的计算步骤

有了上述准备, 我们可以将新方法归纳如下, 其流程图如图 2。

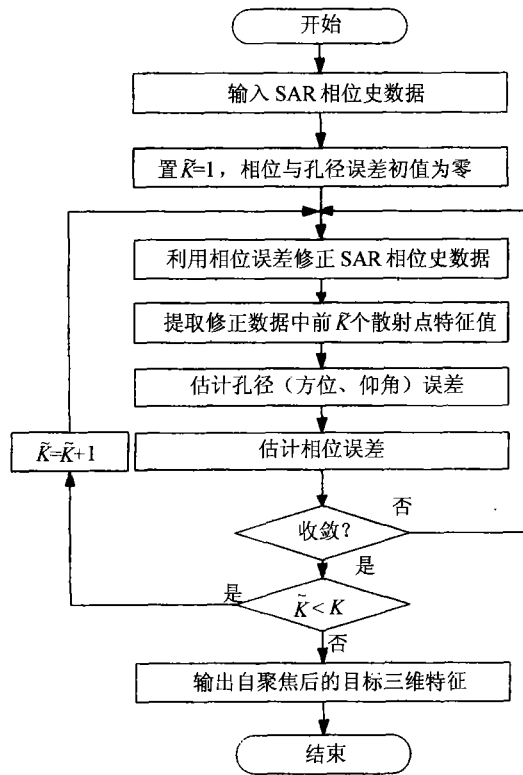


图 2 新自聚焦算法流程图

Fig.2 Flow chart of the new autofocus algorithm

令  $\{\hat{\theta}_m, \hat{\phi}_m\}_{m=1}^M = \{\hat{\theta}_m, \hat{\phi}_m\}_{m=1}^M$  和  $\{\hat{\eta}_m = 0\}_{m=1}^M$ 。

步骤 1:假设  $\bar{K} = 1$ 。

子步骤(a):利用  $\{\hat{\eta}_m\}_{m=1}^M$  由 (15) 式计算  $y_1(n, m)$ 。根据  $\{\hat{\theta}_m, \hat{\phi}_m\}_{m=1}^M$  由  $y_1(n, m)$  中提取目标特征  $\{\hat{a}_k, \hat{f}_k, \hat{f}_k, \hat{f}_k\}_{k=1}^{\bar{K}}$ 。

子步骤(b):利用  $\{\hat{a}_k, \hat{f}_k, \hat{f}_k, \hat{f}_k\}_{k=1}^{\bar{K}}$ , 根据 (14) 式由  $y_1(n, m)$  更新孔径估计  $\{\hat{\theta}_m, \hat{\phi}_m\}_{m=1}^M$ 。再利用  $\{\hat{a}_k, \hat{f}_k, \hat{f}_k, \hat{f}_k\}_{k=1}^{\bar{K}}$  由 (16) 重新确定  $\{\hat{\eta}_m\}_{m=1}^M$ 。

交替进行上面两个子步骤,直至“实际收敛”。这里“实际收敛”由 (13) 式的代价函数  $C$  在相邻两次迭代的相对变化量大小来确定的。

步骤 2:假设  $\bar{K} = 2$ 。

子步骤(a):利用  $\{\hat{\eta}_m\}_{m=1}^M$  根据 (15) 式计算  $y_1(n, m)$ 。根据  $\{\hat{\theta}_m, \hat{\phi}_m\}_{m=1}^M$  由  $y_1(n, m)$  中提取目标特征  $\{\hat{a}_k, \hat{f}_k, \hat{f}_k, \hat{f}_k\}_{k=1}^{\bar{K}}$ 。

子步骤(b):利用  $\{\hat{a}_k, \hat{f}_k, \hat{f}_k, \hat{f}_k\}_{k=1}^{\bar{K}}$ , 根据 (14) 式由  $y_1(n, m)$  更新孔径估计  $\{\hat{\theta}_m, \hat{\phi}_m\}_{m=1}^M$ 。再利用  $\{\hat{a}_k, \hat{f}_k, \hat{f}_k, \hat{f}_k\}_{k=1}^{\bar{K}}$  由 (16) 重新确定  $\{\hat{\eta}_m\}_{m=1}^M$ 。重复上述两个子步骤,直至“实际收敛”。

剩余步骤:类似地继续进行上述步骤,直至  $\bar{K}$  等于  $K$ (期望或需要估计的散射点数目)(如果  $K$  未知,可以采用有效的广义 Akaike)信息论准则(GA-IC)<sup>[9]</sup>来估计)。

### 4 仿真实验

下面我们将通过仿真实验来说明新方法的性能。假设同时存在孔径和相位误差。孔径  $\{\theta_m\}_{m=1}^M$  和  $\{\phi_m\}_{m=1}^M$  的误差分别为  $\pm 0.1^\circ$  和  $\pm 0.3^\circ$  范围内。相位误差  $\{\eta_m\}_{m=1}^M$  在  $\pm \pi/2$  的范围内。数据是由图 3 的曲线孔径获得的,其中曲线孔径有 32 个观测

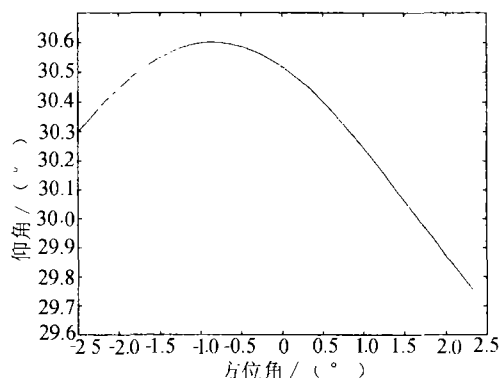
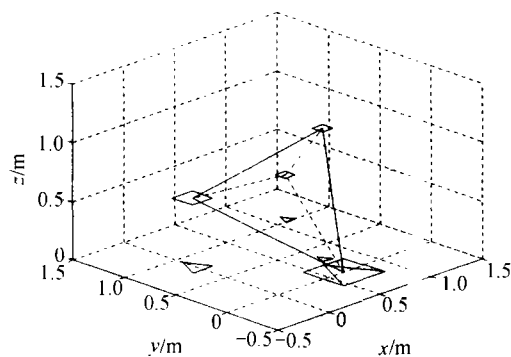


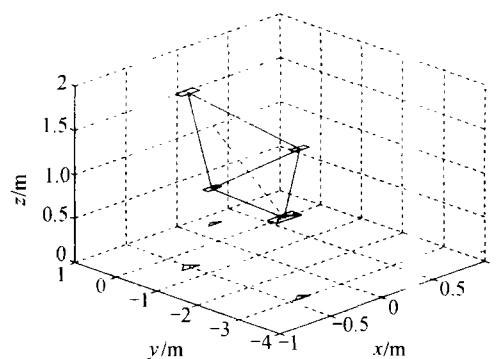
图 3 用于实验的原始曲线孔径

Fig.3 Initial curvilinear aperture for the experimental example

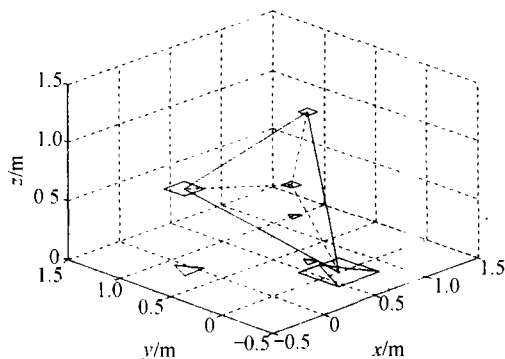
角,每个观测角在距离维有 32 个采样。雷达与场景中心的距离足够大,满足远场假设。散射点的真实分布如图 4(a),矩形的中心表示散射点在三维空间的位置,边长正比于相应散射点的 RCS。三角形表示散射点在地平面的投影位置且它们的尺寸也正比



(a)



(b)



(c)

图 4 三维图像的比较

- (a) 真实图像;(b) 自聚焦处理前;
- (c) 利用新方法进行自聚焦处理后。

Fig.4 Scatterer distribution

- (a) True scatterer distribution;
- (b) Scatterer distribution obtained without autofocus;
- (c) Scatterer distribution obtained with autofocus

于相应散射点的 RCS。假设由于存在背景噪声,4 个散射点的信噪比分别为 10dB, 10dB, 16dB 和 22dB。图 4(b)给出了由曲线孔径获得的未进行自聚焦处理的散射点分布。图 4(c)给出了经新的自聚焦方法处理后的散射点分布。图 4(b)和(c)的比较可见性能获得了明显的改进。

## 5 结 论

本文提出了一种曲线 SAR 的稳健的新自聚焦方法。仿真实验表明新方法可以十分有效地同时实现自聚焦和三维目标特征提取。

### 参 考 文 献 (References)

- [1] Klemm R. Current Trends in SAR Technology [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1997, 12(3):3—8.
- [2] Li J, Liu Z S, Stoica P, 3-D Target Feature Extraction via Interferometric SAR [J]. *IEE Proceedings on Radar, Sonar, and Navigation*, 1997, 144(4):71—80.

- [3] Knaell K. Three-dimensional SAR from Curvilinear Apertures [A]. *IEEE 1996. National Radar Conference [C]*. Ann Arbor, Michigan, 1996
- [4] Li J, Bi Z, Liu Z S, et al. Using Curvilinear SAR for Three-dimensional Target Feature Extraction [J]. *IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*, 1997, 144(10):275—283.
- [5] Wu Renbiao Li. Jian Autofocus and Super Resolution SAR Image Formation [J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar, and Navigation*, 2000, 147(5):217—224.
- [6] Li Jian, Wu Renbiao, et al. A Robust Autofocus Algorithm for ISAR Imaging of Moving Targets [J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(3):1056—1069.
- [7] D C Munson, Jr J D O'Brien, et al. A Tomographic Formulation of Spotlight-mode Synthetic Aperture Radar [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1983, 71(8): 917—925.
- [8] Jakowatz, C V Wahl, Jr D E et al. Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach [M]. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [9] Li J, Stoica P. Efficient Mixed-spectrum Estimation with Applications to Target Feature Extraction [J]. *IEEE Transaction on Signal Processing*, 1996, 44(2): 281—295.

## A Novel Autofocus and 3-D Target Feature Extraction Algorithm for Curvilinear SAR

WU Ren-biao, SU Zhi-gang, LIU Jia-xue, LIU Jie

(Institute of Communications and Information Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** By transmitting signals with large bandwidth and utilizing the relative motion between the radar and the objects to be imaged, synthetic aperture radar(SAR) can produce high-resolution images of targets or scenes of interest. Now, SAR imaging technology has been widely used in many military and civilian applications, such as battlefield awareness, environment monitoring, and city planning. Today, over thirty SAR systems have been put into operation and more are being built around the world. However, most of them can only produce two-dimensional(2-D) SAR images. In practice, 3-D SAR images and 3-D target feature extraction are needed for many applications. The 3-D features of a target scatterer include the radar cross-section(RCS), the 2-D location(range and cross-range) and the height(the third dimensional parameter) of the scatterer.

Very few papers have discussed the 3-D target feature extraction problem. A popular approach to extract the 3-D target features is interferometric SAR(IFSAR), which uses a pair of vertically displaced antennas to obtain coherent and parallel measurement apertures. IFSAR can be used to measure the height but has no resolution capability along the height dimension since it only provides two vertical parallel apertures. Hence IFSAR is only a 2.5-D imaging system. Moreover, in IFSAR, the height measurement involves the troublesome phase unwrapping procedure. Recently, Knaell proposed a new idea for the extraction of 3-D target features, which is based on curvilinear SAR(CLSAR). Unlike the conventional SAR or IFSAR, whose flight trajectory is a straight line, the flight path of a CLSAR system is curve-shaped. CLSAR can be used to form synthetic apertures both in the azimuth and in the height dimensions. Hence CLSAR has resolution capability in the height dimension and the height ambiguity problem encountered in IFSAR is avoided.

There are two challenging issues associated with CLSAR. First, the flight path of CLSAR cannot be controlled or measured accurately and the autofocus task here is more complicated than the conventional SAR systems. Second, the aperture of a CLSAR is like a sparse array. The spread function of a point scatterer has high sidelobes and hence the images obtained with conventional Fourier analysis have artifacts. We must carefully devise the feature extraction algorithm so that meaningful features can be extracted.

Recently, Wu et al. have proposed a unified robust autofocus algorithm for the conventional 2-D SAR and ISAR imaging. In this paper, we have successfully extended them to the simultaneous autofocus and 3-D target feature extraction via CLSAR. The new algorithm is a parametric approach but is based on a flexible data model and a robust parameter estimation algorithm. The autofocus is achieved by enhancing the focusing of the dominant scatterers of the target. The advantages of the new algorithm over existing autofocus algorithms include: 1) selecting the dominant scatterers of a target automatically in the 3-D image domain, 2) eliminating the necessary condition of a target containing well isolated or very dominant scatterers, 3) combining the phase and radar cross section information from the selected scatterers optimally by minimizing a nonlinear least squares cost function, and 4) avoiding the burdensome phase unwrapping step. The new approach can be used to significantly improve the estimation accuracy of the target features. Numerical examples are provided to illustrate the performance of the proposed algorithm.

**Key words:** synthetic aperture radar; curvilinear synthetic aperture radar; motion compensation; feature extraction