

基于信号的环视 SAR 成像参数估计方法

陈功伯^① 李勇^{*①} 陶满意^②

^①(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 210016)

^②(上海卫星工程研究所 上海 200240)

摘要: 环视合成孔径雷达(SAR)是一种新的雷达成像模式,其成像结果的图像质量与成像参数的精度密切相关,特别是雷达平台实际运动速度的不精确测量会严重影响图像质量。该文针对环视 SAR 成像模式的特点,提出了一种基于雷达回波信号的平台运动速度和天线扫描角度估计方法。该方法借鉴了多波束多普勒导航技术的基本思想,建立了新的数学模型和方程组表达式,并在实际处理中以最小二乘为准则实现了参数搜索和最佳逼近。仿真数据处理的结果表明,该方法能准确地实现上述参数估计,从而显著提高了环视 SAR 系统输出图像的质量。

关键词: 合成孔径雷达; 环视扫描模式; 参数估计; 最小二乘解

中图分类号: TN959.3

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2013)02-0203-07

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2013.20073

Data-based Parameter Estimation Method for Circular-scanning SAR Imaging

Chen Gong-bo^① Li Yong^① Tao Man-yi^②

^①(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and
Astronautics, Nanjing 210016, China)

^②(Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

Abstract: The circular-scanning Synthetic Aperture Radar (SAR) is a novel working mode, and its image quality is closely related to the accuracy of the imaging parameters, particularly considering the inaccuracy of the real speed of motion. According to the characteristics of the circular-scanning mode, a novel data-based method for estimating the velocities of the radar platform and the scanning-angle of the radar antenna is proposed in this paper. By referring to the basic concept of the Doppler navigation technique, we first improve the mathematic model and formulations for the parameter estimation. The optimal parameter approximation based on the least square criterion is then realized for solving the equations derived from the data processing. The simulation results verify the validity of the proposed scheme.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Circular-scanning mode; Parameters estimation; Least-square approximation

1 引言

合成孔径雷达^[1](Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种主动式微波成像雷达。常用的机载 SAR 成像模式包括聚束式、条带式 and 扫描式,如图 1(a)~图 1(c)。这 3 种模式的成像区域均位于雷达平台航迹的一侧,但在某些特殊场合,如为导弹等精确制导武器提供景象匹配所需的图像信息时,需要即时地获得飞行路线下方左右两侧环形区域的雷达图像,即环视 SAR 工作模式^[2-5],如图 1(d)。

为了实现精确匹配,环视 SAR 图像必需具备一定的几何准确度,进而对成像参数精度也提出了更高的要求。在文献[2]中,研究了几何失真校正处理中高度误差的估计和补偿方法,而忽略了速度误差的影响。实际上,由于长时间的误差积累,现有惯导系统提供的速度值误差明显,影响了几何失真校正的精度,从而严重降低了环视 SAR 系统输出图像的质量。此外,雷达天线扫描角度的不准确性也不利于图像的无缝拼接。针对此问题,本文研究了基于雷达回波数据的载机运动速度和天线扫描角度误差估计方法,根据环视 SAR 系统的特点并结合了多普勒导航技术的思想,在无任何辅助手段的条件下,通过对不在同一平面内的波束回波信号进

2012-10-08 收到, 2013-05-21 改回; 2013-05-27 网络优先出版
江苏省高校优势学科建设工程资助项目和航空科学基金
(20112052025)资助课题

*通信作者: 李勇 limack@nuaa.edu.cn

行杂波中心频率测量, 实现了对平台 3 维运动速度和天线扫描角误差的估计。

本文基于以上背景, 研究了成像参数估计方法。首先, 介绍了多普勒导航技术的原理和结构设计, 分析了环视 SAR 成像模型和算法; 进而根据环视 SAR 的特点建立了新的数学模型, 推导了参数估计方程, 并设计了基于最小二乘准则的参数估计方法; 最后, 通过仿真手段验证了该方法用于速度和天线扫描角度参数精确估计的有效性。

2 多普勒导航原理

多普勒导航技术本质上是一种利用地杂波的多普勒频率变化实现运动平台 3 维速度测量的技术手段, 其典型应用是机载“两面神”雷达系统^[6]。配备该系统的载机运动平台可以实现运动速度的实时测量, 并累积计算平台运动轨迹, 从而具备了自主导航功能。图 1 以 3 波束结构为例, 分析了多普勒导航雷达系统用于测量运动平台速度的原理。在载机飞行过程中, 由于需要实时地测量载机运动速度的 3 维速度分量, 导航雷达系统至少需要向 3 个不同方向同时发射测速波束, 以获得 3 个不同的多普

勒频率来构建方程组。雷达天线被安装在稳定的平台上, 建立东北天地理坐标系, 即 $x-y-z$ 坐标系。

图 2 中, 3 个波束的中心线相对于雷达的角度是确定的。若用 φ, θ 表示波束中心的俯仰角和天线扫描角, 并设由接收到的 3 波束回波信号估计出的多普勒中心频率分别为 f_{dc1}, f_{dc2} 和 f_{dc3} , 则载机运动的 3 个速度分量 V_x, V_y 和 V_z 可以由如下方程组确定^[7,8]:

$$\begin{cases} f_{dc1} = \frac{2}{\lambda}(-V_x \cos \theta \sin \varphi - V_y \sin \varphi \sin \theta - V_z \cos \varphi) \\ f_{dc2} = \frac{2}{\lambda}(V_x \cos \theta \sin \varphi - V_y \sin \varphi \sin \theta - V_z \cos \varphi) \\ f_{dc3} = \frac{2}{\lambda}(V_x \cos \theta \sin \varphi + V_y \sin \varphi \sin \theta - V_z \cos \varphi) \end{cases} \quad (1)$$

求解联立方程组(1), 可得

$$\begin{cases} V_x = \frac{(f_{dc2} - f_{dc1})\lambda}{4 \cos \theta \sin \varphi} \\ V_y = \frac{(f_{dc3} - f_{dc2})\lambda}{4 \sin \theta \sin \varphi} \\ V_z = \frac{(f_{dc3} + f_{dc1})\lambda}{-4 \cos \varphi} \end{cases} \quad (2)$$

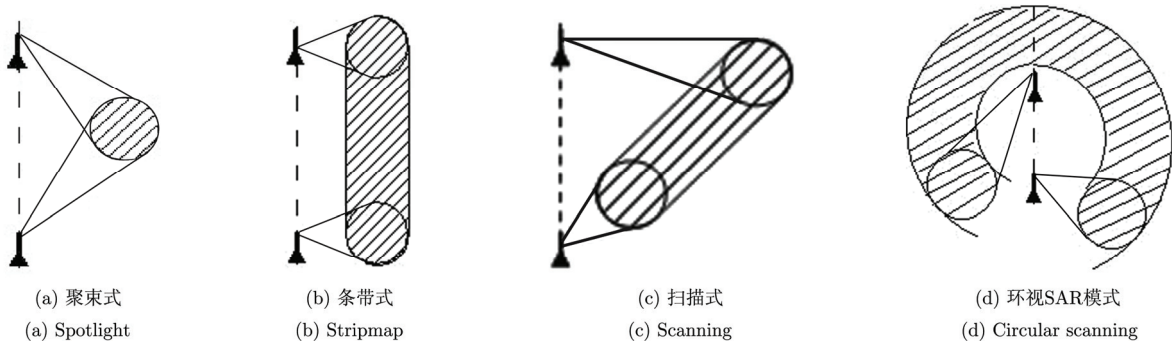


图 1 机载 SAR 成像模式

Fig. 1 The imaging modes for airborne SAR

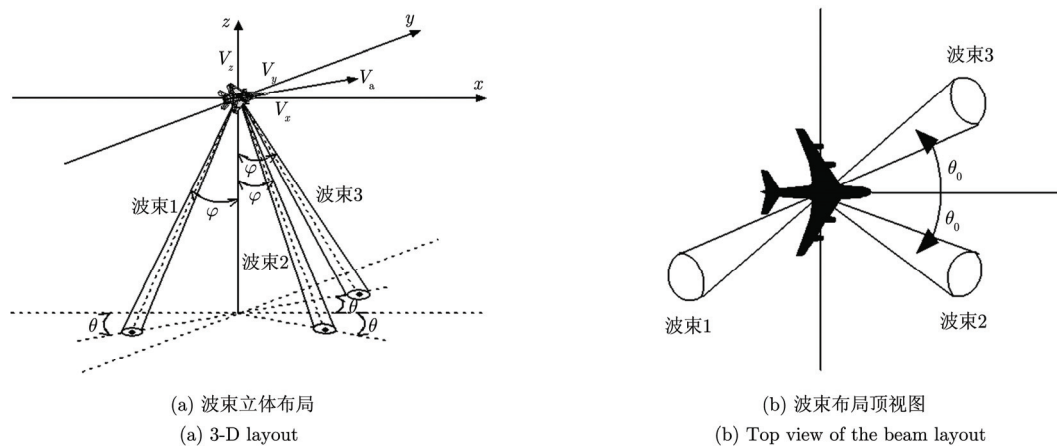


图 2 3 波束多普勒雷达测速模型

Fig. 2 The velocity measuring model for Doppler radar using three radar beams

其中, V_x, V_y 和 V_z 均是以坐标轴的正方向为基准, f_{dc1}, f_{dc2} 和 f_{dc3} 的正负性由波束指向和合速度方向共同决定。二者方向一致时为正, 反之为负。

可见, 多普勒导航技术的基本思想是: 至少向地面辐射 3 个不在同一平面内的微波电磁波束, 并从雷达回波信号中提取运动平台的 3 维速度信息。而本文研究的对象, 即环视 SAR 系统在对地观测的一个 360° 扫描周期内可以获得相当多个不在同一平面内的微波电磁波束, 这为多普勒导航技术应用于环视 SAR 数据处理提供了物理可能。但是, 与“两面神”雷达系统相比较, 多普勒导航技术用于环视 SAR 数据处理时, 二者的数学模型显著不同, 主要体现在: (1)前者是多波束同时发射雷达信号, 后者是单一波束在扫描过程中连续发射雷达信号, 时间换取空间; (2)前者的多个波束的空间夹角固定已知, 后者因波束扫描波束空间夹角会存在误差。由于此异同点, 必须对原始的多普勒导航技术进行了改进, 以建立了新的数学模型, 实现针对环视 SAR 系统的参数估计。

3 环视 SAR 成像模型及算法

3.1 成像几何分析

对环视 SAR 系统而言, 扫描一周的时间较短, 通常认为在此周期内雷达运动速度恒定。根据分析需要, 建立以载机飞行水平方向为 x 轴、竖直方向为 z 轴的雷达与目标区域的相对坐标关系, 如图 3 所示。高度、速度、中心斜距以及天线扫描角等成像参数由惯导系统给出。设起始时刻机载位于原点正上方, 起始高度值为 H 、机载航迹水平速度为 V_x 、垂直速度为 V_z 、瞬时天线扫描角度为 θ 、天线扫描角速度为 ω 、环视一周时间为 T 。

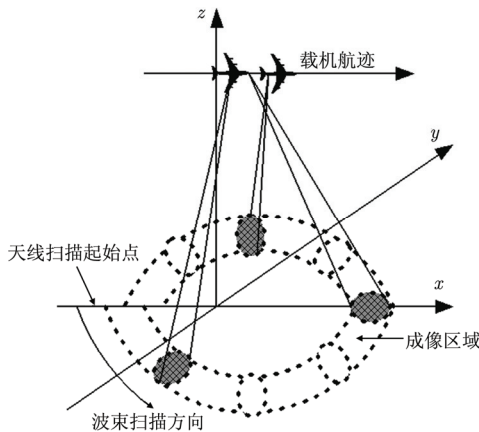


图3 环视 SAR 成像几何示意图

Fig. 3 Imaging geometry of the circular-scanning SAR

载机运动可以由式(3)描述:

$$\begin{cases} x_{apc}(t) = V_x t \\ y_{apc}(t) = 0 \\ z_{apc}(t) = H + V_z t \end{cases} \quad (3)$$

式中, $[x_{apc}(t), y_{apc}(t), z_{apc}(t)]$ 为 t 时刻机载雷达天线相位中心(Antenna Phase Center, APC)的瞬时坐标。

3.2 成像处理算法

为了满足实时性的要求, 采用基于子孔径的线性距离多普勒(RD)成像算法, 子孔径成像几何关系如图 4 所示。 V_a 是机载的飞行速度, φ 是波束俯仰角, φ_a 是扇环所对圆心角, β_r 为波束距离向宽度, β_a 为波束方位向宽度, r_0, r_1 和 r_2 分别为地面波束投影区域的中心半径、内径和外径, R 为波束中心斜距, 且中心斜距 R 可以实时精确测量, θ 为瞬时天线扫描角。

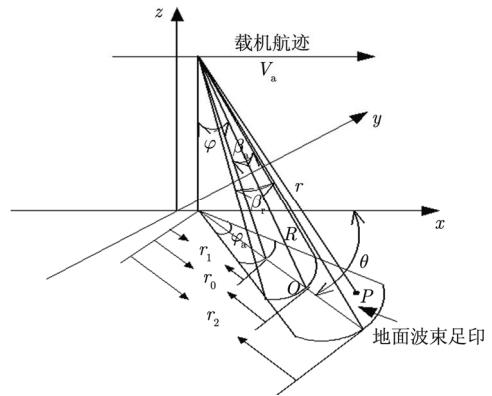


图4 子孔径成像几何关系

Fig. 4 Geometric relationship for one subaperture processing

环视 SAR 成像处理过程采用基于子孔径的线性距离多普勒(RD)成像算法, 其子图像几何失真校正方法如文献[9]所述。以雷达波束足印中心与地面交点为聚束参考点, 可知某子孔径中心时刻 t 的多普勒中心频率 f_{dc} 的表达式为

$$f_{dc} = \frac{2}{\lambda} (V_x \cos \theta \sin \varphi - V_z \cos \varphi) \quad (4)$$

其中

$$\varphi = \arccos \frac{H + V_z t}{R}$$

通过式(4)可以看出多普勒中心频率与速度 V_x 和 V_z 以及天线扫描角 θ 有关, 如果要通过类似式(4)的方程解速度和天线扫描角, 必须至少有 3 个不同的多普勒方程建立方程组才能解出 3 个参数值。为此下面将根据环视 SAR 的特点利用多普勒测速技术来估计速度值和天线扫描角度。

4 环视 SAR 参数估计方法

由图 3 可知, 环视 SAR 成像模型中, 随着载机的飞行, 波束的不断旋转, 环扫一周形成多个不在同一平面内的波束回波信号, 这为多波束测速提供了条件。在环扫一周的较短时间内, 可以认为机载以匀速直线飞行。速度对图像的几何失真校正产生很大的影响, 同时只要目标在照射区域内, 天线扫描角度误差对目标的几何失真校正无影响, 但是对于子图之间的拼接产生很大影响, 所以从多个波束中任意选择至少 3 个波束进行组合采用最小二乘法进行速度和天线扫描角度误差估计, 本文以 3 个波束进行组合为例, 如图 5 所示。

选择不同时刻的波束, 认为 3 个不同时刻处的速度值是近似相等的。惯导给出的起始时刻高度值为 H (在本文研究中, 起始高度值精确已知), 瞬时天线扫描角为 θ , 估计得到的多普勒中心频率所对应的斜距 R 可以实时精确测量, 设待估计的 2 维速度值为 V_x 和 V_z , 待估计的天线扫描角误差值为 $\Delta\theta$, 在这里我们讨论的扫描角误差是指在周期内的固定误差, 例如由波束滞后等原因所引起的。

假设任意选择的 3 个波束对应的扫描时刻为: 波束 1 扫描时刻为 t_1 , 波束 2 扫描时刻为 t_2 , 波束 3 扫描时刻为 t_3 , 可以得到 3 个波束时刻的 APC 高度分别为 $H + V_z t_1$, $H + V_z t_2$ 和 $H + V_z t_3$, 同时 3 波束时刻对应的中心斜距分别 R_1 , R_2 和 R_3 , 由此可以得到 3 个不同时刻波束中心对应的俯仰角分别为

$$\begin{cases} \varphi_1 = \arccos \frac{H + V_z t_1}{R_1} \\ \varphi_2 = \arccos \frac{H + V_z t_2}{R_2} \\ \varphi_3 = \arccos \frac{H + V_z t_3}{R_3} \end{cases} \quad (5)$$

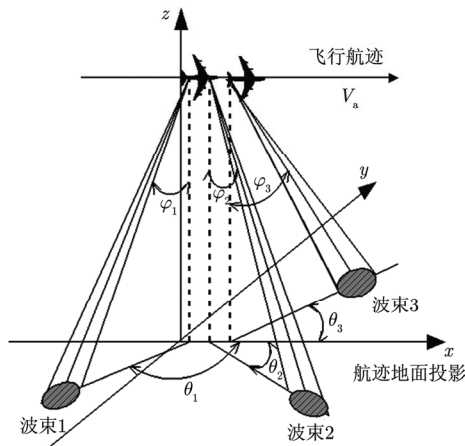


图 5 3 波束选择示例

Fig. 5 Demonstration for the selection of three radar beams

根据回波信号估计得到 3 个波束多普勒中心频率值, 然后利用最小二乘法估计速度值和天线扫描角的误差值, 如式(6)所示, 对式(6)以速度值和天线扫描角的误差值为参数进行 3 维搜索使得 K 值最小, K 最小值时对应的速度值和角度误差值即为所要估计的值。

$$K = \left(f_{dc1} - \frac{2}{\lambda} (V_x \cos(\theta_1 + \Delta\theta) \sin \varphi_1 - V_z \cos \varphi_1) \right)^2 + \left(f_{dc2} - \frac{2}{\lambda} (V_x \cos(\theta_2 + \Delta\theta) \sin \varphi_2 - V_z \cos \varphi_2) \right)^2 + \left(f_{dc3} - \frac{2}{\lambda} (V_x \cos(\theta_3 + \Delta\theta) \sin \varphi_3 - V_z \cos \varphi_3) \right)^2 \quad (6)$$

实际上, 在环视 SAR 回波信号中可以取得很多不同平面的波束, 这样从中任选 3 个组合通过最小二乘法估计得到参数值, 然后对不同组合得到的估计值取平均可以进一步提高参数估计的准确度, 如图 6。

5 仿真结果与分析

在仿真验证中, 设雷达载机沿 x 轴正方向匀速直线飞行(参照图 3 坐标系), 地面仿真点目标之间的间隔(包括 x 轴与 y 轴方向)距离为 50 m, 仿真目标点的分布区域在 $-4000 \text{ m} < x < 4500 \text{ m}$, $-4000 \text{ m} < y < 4500 \text{ m}$ 。仿真系统基本参数如表 1 所示。可见, 设计成像分辨率为 5 m。

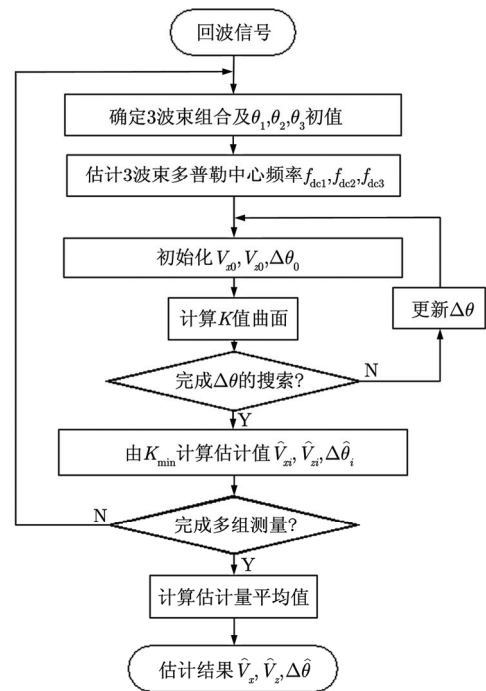


图 6 本文研究的参数估计方法流程图

Fig. 6 Flowchart of the proposed parameter estimation method

表 1 仿真系统基本参数

Tab. 1 The fundamental parameters for the simulation

参数	取值
雷达波长 λ	X 波段
飞行起始高度 H	4900 m
信号带宽 B	55 MHz
信号采样率 f_s	66 MHz
脉冲重复频率 PRF	3000 Hz
中心斜距 R	5500 m
天线扫描速度 ω	50°
图像分辨率 $\rho_a \times \rho_r$	$5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$

首先，如果直接用带有测量误差的参数进行成像时，输出成像结果如图 7 所示(含有误差的测量参数参照表 2)。由图 7 可以看出，成像及子图拼接效果并不理想，部分区域成像结果非常模糊，特别是在平行载机运动的方向上(即 x 轴平行方向上)出现了明显的扇形错位和拼接间隙，从而严重削弱了环视 SAR 图像的实际应用价值。

表 2 运动参数的测量值和实际值

Tab. 2 Motion parameters with and without errors

参数	系统测量值	实际值
水平速度 V_x	140 m/s	141 m/s
垂直速度 V_z	0 m/s	2.5 m/s
扫描方位角误差	0°	-2°

利用前文所述的方法进行参数估计， x 轴速度搜索范围为 120 m/s~160 m/s， z 轴速度搜索范围为 $-5 \text{ m/s} \sim 5 \text{ m/s}$ ，搜索间隔为 0.5 m/s。天线扫描角误差搜索范围为 $-3^\circ \sim 3^\circ$ ，搜索间隔为 0.5° 。图 8(a)、图 8(b)和图 8(c)给出了天线扫描角误差搜索值为 -1° ， -2° 和 1.5° 时对应的 x 轴速度和 z 轴速度 2 维搜索的 K 值曲面图。

图 8 表明，当天线扫描角的误差补偿值为 -2° 时 K 值达到极小。该 K 值极小值所对应的 x 轴搜索速度为 141 m/s， z 轴速度为 2.5 m/s，完全等于载机实际的速度与天线扫描角的实际偏差角度。利用该组估计参数值再次对原始数据进行成像处理，结果如图 9 所示。可见，点目标聚焦效果良好，基本实现无缝拼接，高质量图像面积显著扩大至前斜视观测区域，有利于图像的后期应用。

通过图 7 和图 9 的对比可见，即便是较小的雷达运动平台的 3 维运动速度误差仍会对环视 SAR 几何失真校正造成很大影响，导致目标校正位置错误，特别是前斜视观测区域发生拼接图像的几何形变，也客观地验证了本文研究的参数估计方法的有效性。

6 结论

由于环视 SAR 图像主要设计用于实现雷达图像与光学、红外等图像的景象匹配及目标搜索定位，要求其成像结果几何精度很高。影响成像结果几何精度的最大因素是雷达平台运动的 3 维速度和天线扫描方位角误差。在无其它辅助测量手段的前提下，本文研究了一种基于回波数据的机载环视 SAR 成像

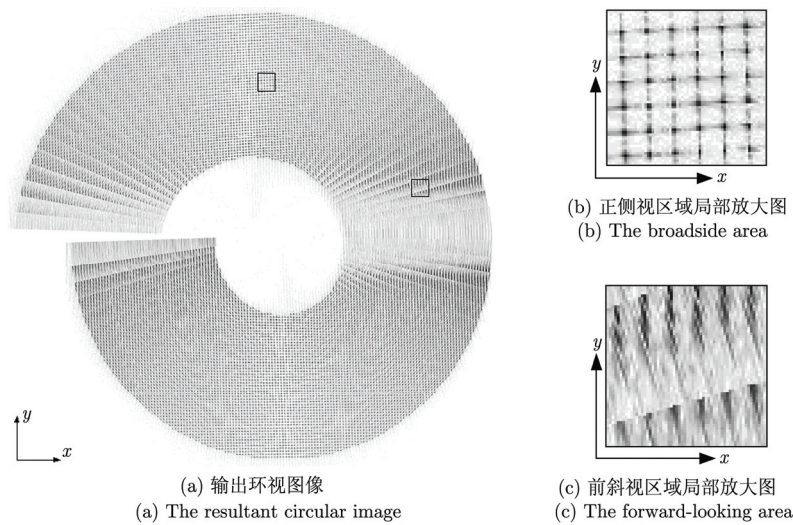


图 7 使用原始参数的点目标成像结果

Fig. 7 Point target simulation results using the original parameters

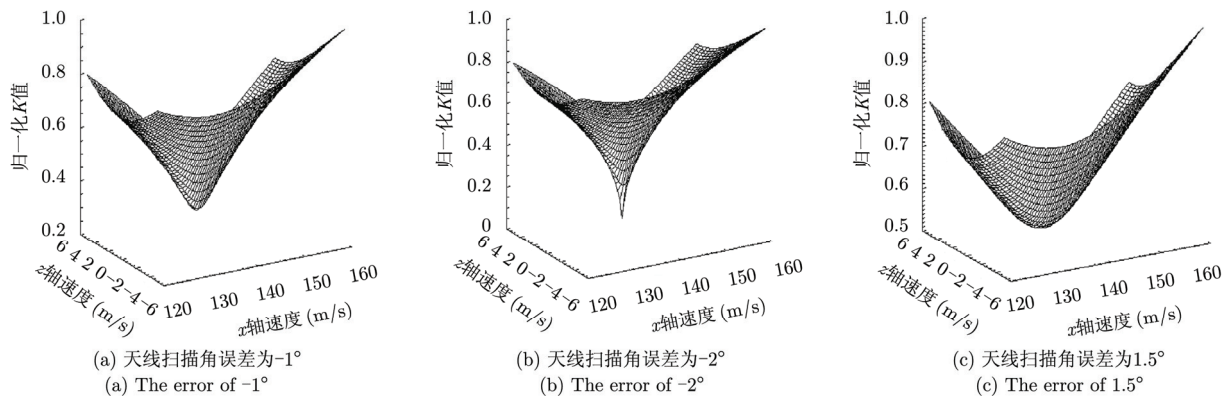
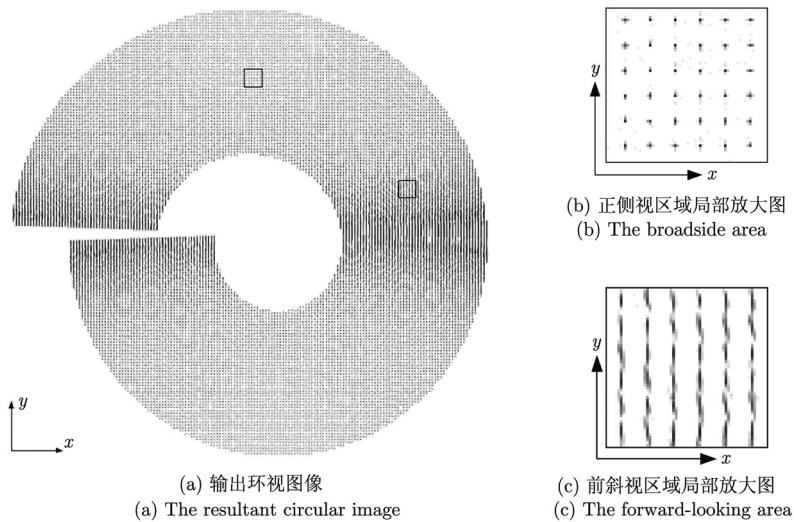
图8 若干天线扫描角度误差对应的 K 值曲面图Fig. 8 The measurements of K value with different antenna scanning-angle errors

图9 使用估计参数的点目标成像结果

Fig. 9 Point target simulation results using the estimated parameters

参数估计方法, 根据环视 SAR 数学模型的特点, 结合传统的多普勒导航技术, 提出了速度值和天线扫描角误差估计方程及其数值最优解法。仿真数据的处理结果验证表明, 该参数估计方法具有较高的估计精度, 速度估计误差小于 1 m/s , 但考虑到该方法的运算周期较长, 更适合回波数据地面精细处理。

参考文献

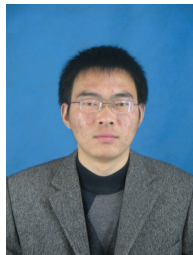
- [1] Ian G C and Frank H W. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 20-132.
- [2] 毛新华, 朱岱寅, 李勇, 等. 环视 SAR 几何失真校正误差分析及补偿技术研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(11): 2706-2709.
Mao Xin-hua, Zhu Dai-yin, Li Yong, et al. Error analysis of geometric distortion correction and compensation techniques for circular-scanning SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(11): 2706-2709.
- [3] Li Yong and Zhu Dai-yin. Geometric distortion correction algorithm for circular-scanning SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(2): 376-380.
- [4] Tao Man-yi, Li Yong, Zhu Dai-yin, et al. Signal based parameter estimation for precise circular-scanning SAR imaging[C]. 2010 International Symposium on Signals Systems and Electronics (ISSSE), Nanjing, China, Sept. 17-20, 2010, 2: 1-4.
- [5] 孙文峰, 陈安, 邓海涛, 等. 一种新的机载 SAR 图像几何校正和定位算法[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 553-556.
Sun Wen-feng, Chen An, Deng Hai-tao, et al. A new algorithm of imaging geometric correction and positioning for airborne SAR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(3): 553-556.
- [6] Myron Kayton and Walter R Fried. Avionics Navigation

- Systems[M]. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1997: 449-502.
- [7] 禹卫东. 合成孔径雷达信号处理研究[D]. [博士学位], 南京航空航天大学, 1997.
Yu Wei-dong. Synthetic aperture radar signal processing[D]. [Ph.D. dissertation], Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1997.
- [8] Yu M, Xu J, Peng Y-N, *et al.*. Joint estimation of Doppler centroid and rate for SAR with large range migration[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2007, 1(3): 207-212.
- [9] Li Yong, Zhu Dai-yin, Zhu Zhao-da, *et al.*. Study on geometric distortion correction in the subaperture processing for high squint airborne SAR imaging[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2006, 15(1): 113-116.

作者简介



陈功伯(1986-), 男, 福建福州人, 南京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理。



陶满意(1985-), 男, 江苏句容人, 上海卫星工程研究所, 工程师, 研究方向为星载合成孔径雷达系统设计。



李 勇(1977-), 男, 河南洛阳人, 南京航空航天大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为雷达信号处理、合成孔径成像算法及参数估计。

E-mail: limack@muaa.edu.cn