

文章编号: 1672-2892(2010)03-0297-06

环视 SAR 成像处理中的几何失真校正方法

高叶盛¹, 朱岱寅²

(1.上海交通大学 电子工程系, 上海 200240; 2.南京航空航天大学 信息科学与技术学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 环视合成孔径雷达(SAR)工作于波束扫描模式, 雷达天线以垂直地面方向为轴线作圆锥扫描, 实现对载机周围 360°范围内的聚焦成像。为了研究环视 SAR 成像处理中几何失真校正问题, 通过波束扫描至空间不同位置处的成像几何关系, 分析了成像过程中引起几何失真的机理, 提出了一种基于子图像素实际地理坐标的几何失真校正方法。利用文中给出的方法对实测环视 SAR 数据进行处理, 得到无几何失真的 SAR 图像, 证明该方法有效。

关键词: 合成孔径雷达; 几何失真; 图像拼接

中图分类号: TN958

文献标识码: A

Geometric distortion correction in the circular scanning SAR imaging processing

GAO Ye-sheng¹, ZHU Dai-yin²

(1.Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2.College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

Abstract: Circular scanning Synthetic Aperture Radar(SAR) works in beam-scan mode, whose radar antenna conically scans with respect to the vertical direction, so that the images of full circular area around the radar platform can be formed. The geometric distortion correction of the images processed by an airborne circular scanning SAR was investigated. While the radar antenna was scanning, the imaging geometry also changed with time. After discussing the mechanism of geometric distortion, a method of geometric distortion correction based on geographic coordinate of subimage's pixel was put forward. Live data processing validated the method proposed, and SAR image without geometric distortion was obtained.

Key words: Synthetic Aperture Radar; geometric distortion; image mosaicing

常用的合成孔径雷达(SAR)成像模式包括条带式、聚束式和扫描式。雷达工作在这 3 种模式下, 成像区域均位于雷达平台航迹的一侧, 但在某些特殊场合, 例如应用于景象匹配时, 需要得到飞行路线下方环形区域的 SAR 图像。环视工作模式是为了解决该问题而设计的一种特殊 SAR 成像模式, 通过雷达天线以垂直地面方向为轴的圆锥扫描来不断获取雷达平台 360°范围内的地面雷达回波, 进而利用信号处理的方法得到环视 SAR 图像^[1]。环视 SAR 对信号处理提出了更高的要求, 必须解决波束扫描至空间任意位置处的成像处理问题。对于环视 SAR, 通常采用分块处理的方法, 因此完整的环视 SAR 成像处理算法包括子图成像、几何失真校正和图像拼接这 3 部分。子图成像时采用线性 R-D 算法^[2-3], 这是一种基于转台的成像处理算法, 所得各子图均存在不同程度的几何失真。为了使子图有效拼接得到完整的环视成像结果, 必须进行几何失真校正^[4-5]。本文提出了一种基于子图像素实际地理坐标的几何失真校正方法, 即计算子图各像素单元实际地理坐标, 通过将各像素单元投影到预先设定的地面校正网格的方法来完成几何失真校正。

1 成像几何关系及几何失真产生机理

某一子图像中, 不同散射点的相对位置关系与实际分布相比发生畸变, 而且同一散射点在不同子图像中的位置也存在变化, 通称为几何失真。引起几何失真的原因除了运动测量误差以外, 与采用的成像算法有很大关系, 因此必须根据不同的成像算法使用合适的几何失真校正方法。

图1给出环视SAR在 $\alpha=90^\circ$ 和 $\alpha=30^\circ$ 时成像几何关系。设载机飞行高度为 H_0 ，以速度 v_a 水平匀速飞行。 $t=0$ 时刻载机地面投影为原点 O ，以 v_a 方向为 x 轴正向，依右手准则建立 x - y - z 坐标系，称为地理坐标系。 α 为多普勒锥角^[3]，即雷达波束指向与航迹的夹角； ψ 为波束擦地角^[6]，即波束指向与 x - y 平面的夹角； θ_s 为斜视角，即波束指向地面投影与正侧视方向的夹角。波束地面足印近似认为是1个扇环，如图1中阴影部分所示，圆弧对应的圆心角为 φ_a ，雷达波束匀速转动，扫描速度为 Ω ，波束方位角(雷达波束指向地面投影与航迹地面投影的夹角)初始值为 θ_0 ，则瞬时方位角为 $\theta(t)=\theta_0+\Omega t$ 。载机瞬时位置为 C ，其地面投影为 C' ，瞬时成像区中心 O' 。对于机载SAR情形，可以忽略地球曲率的影响。

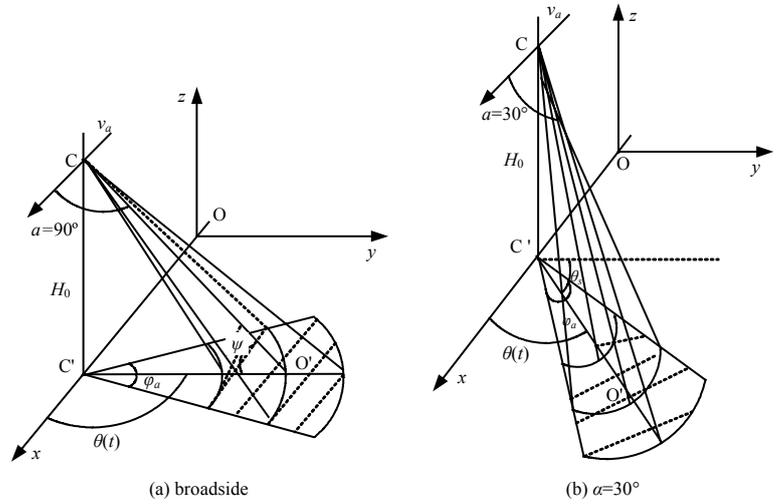


Fig.1 Geometry of beam scanning
图1 波束扫描至空间不同位置时成像几何关系

用于子图成像的线性R-D算法，本质上是一种基于转台的成像处理算法，成像结果中像素点的位置与地面等距离多普勒网格相对应^[3]。当载机匀速水平飞行时，地面等距离线为一簇同心圆，地面等多普勒线为一簇双曲线，并关于航迹地面投影对称，见图2。由此，引起几何失真的主要原因是地面的等距离多普勒线既不等间距也不相互正交。

波束扫描至不同位置，引起雷达斜视角不同，回波信号的多普勒中心随之变化，各子图的几何失真程度也存在差异。由图2可看出，在正侧视，即当 $\theta(t)$ 接近 90° 或者 270° 时，等距离线和等多普勒线可近似认为是相互正交的，此时可以根据距离和多普勒信息区分地面散射点；而当 $\theta(t)$ 接近 0° 或者 180° 时，等距离线和等多普勒线近似认为是相互平行的，此时已经不能再利用距离多普勒信息区分地面散射点。

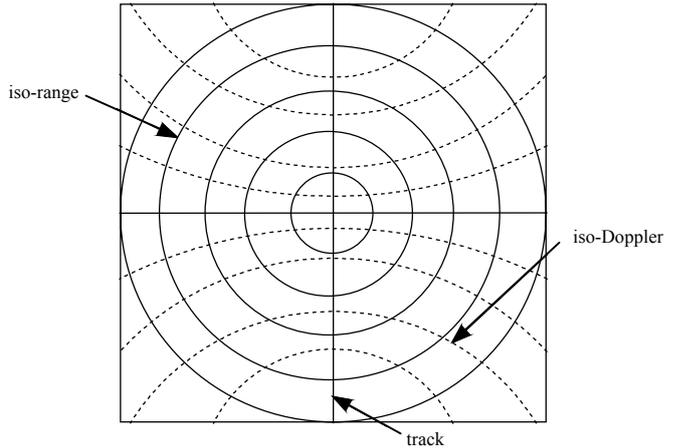


Fig.2 Iso-range-Doppler distribution
图2 地面等距离多普勒线分布

设天线相位中心(Antenna Phase Center, APC)瞬时坐标为 $[x(t),y(t),z(t)]$ ，地面散射点坐标为 $(x,y,0)$ ，参考点(成像区中心)坐标为 $(x_0,y_0,0)$ ，则APC至成像区中心的距离 $r_0(t)$ 为：

$$r_0(t) = \sqrt{[x(t)-x_0]^2 + [y(t)-y_0]^2 + z^2(t)} \tag{1}$$

成像区中心多普勒频率 f_{d_0} 为：

$$f_{d_0} = -\frac{2dr_0(t)}{\lambda dt} \tag{2}$$

式中 λ 为信号波长。

APC至散射点的距离 $r(t)$ 为：

$$r(t) = \sqrt{[x(t)-x]^2 + [y(t)-y]^2 + z^2(t)} \tag{3}$$

该散射点多普勒频率 f_d 为：

$$f_d = -\frac{2dr(t)}{\lambda dt} \tag{4}$$

线性 R-D 算法进行子图成像时，相对于成像区中心的运动补偿在距离向完成了距离对准，通过乘以成像区中心回波多普勒历史的共轭对方位向回波进行了 dechirp 处理，所以各散射点在图像中的位置由孔径中心时刻该散射点与 APC 的距离和多普勒频率相对于参考点之差决定。由式(3)和式(4)可知， $r(t)$ 和 f_d 都不是 x 和 y 的线性函数，所以图像中的点不再是地面散射点分布的真实反映，会产生几何失真。

通过地面点阵仿真成像，说明波束扫描至空间不同位置处图像几何失真情况。地面点阵(5×11)见图 3，各点 x,y 方向间距均为 100 m。图 4 为正侧视时运用线性 R-D 算法成像结果，图 5 为 $\alpha=30^\circ$ 时运用线性 R-D 算法成像结果，图中箭头方向表示远距离。从成像结果可看出，波束扫描至空间不同位置处成像结果均有不同程度的几何失真，不再是地面散射点分布的真实反映，地面等间距排列的点阵在图像中也不再是等间距的，比较图 4 和图 5 可以发现，随着斜视角的增加，几何失真的程度会越来越严重，且图 5 在方位向出现了“卷绕”现象。事实上，线性 R-D 算法的几何失真程度会随着地面散射点与参考点(通常选择成像区中心作为参考点)距离的增加和斜视角的增加而愈加严重^[7]。对于环视 SAR 而言，波束扫描至不同位置时成像分辨率不同，各子图几何失真的程度也不同，无法将这样的子图直接拼接得到满足要求的环视成像结果，因此必须进行准确的几何失真校正。

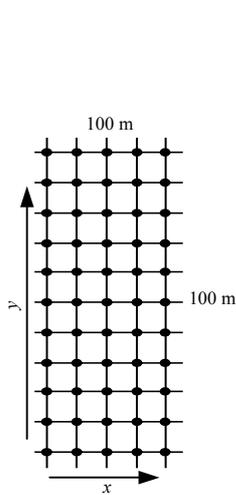


Fig.3 Sketch of simulation scatterers
图 3 地面仿真点阵分布示意图

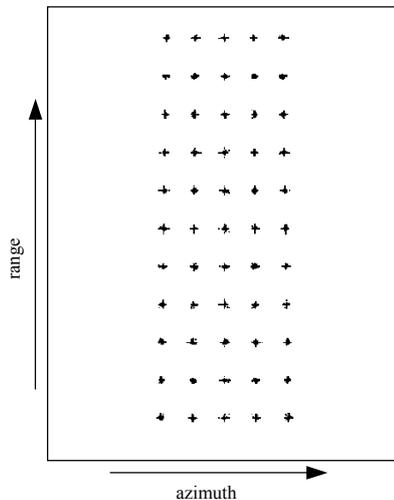


Fig.4 Simulation result(broadside)
图 4 正侧视时仿真成像结果

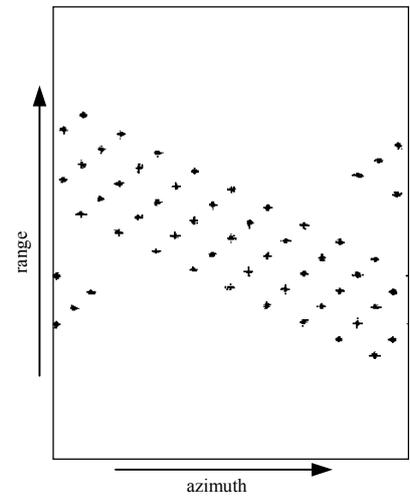


Fig.5 Simulation result($\alpha=30^\circ$)
图 5 $\alpha=30^\circ$ 时仿真成像结果

2 几何失真校正

假设孔径中心时刻 t ，天线相位中心位于 C ，其地面投影 C' 在 $x-y$ 中的坐标为 (x_{apc}, y_{apc}) ，成像区中心 O' ，瞬时波束指向地面斜视角为 $\theta(t)$ ，几何失真校正模型见图 6。由于整个成像区的几何失真校正以单个散射点校正为基础的，所以把成像区划分成如图 6 的均匀排列的地面校正网格，各网格 x 轴上的间隔为 Δ_x ， y 轴上的间隔为 Δ_y ， Δ_y 和 Δ_x 分别根据 y 方向和 x 方向的地面分辨率确定。

通过前面的分析，已经明确几何失真在子图成像过程中是不可避免的，要得到完整的环视图像，必须对几何失真进行校正。本文进行几何失真校正的基本思路是基于子图像素实际地理坐标的，即先求得当前子图像中各像素单元对应的地理坐标，然后将子图各像素点能量投影到与其临近的各地面校正网格点上，完成几何失真校正。所以本方法的重点是计算图像上各像素点所对应的地理坐标。为便于说明，本文提出方法中子图像素地理坐标的计算过程，需要以 C' 为原点， C' 与瞬时成像区中心连线 $C'O'$ 为 y' 轴，建立地面校正坐标系 $x'-y'$ ，见图 7(a)，

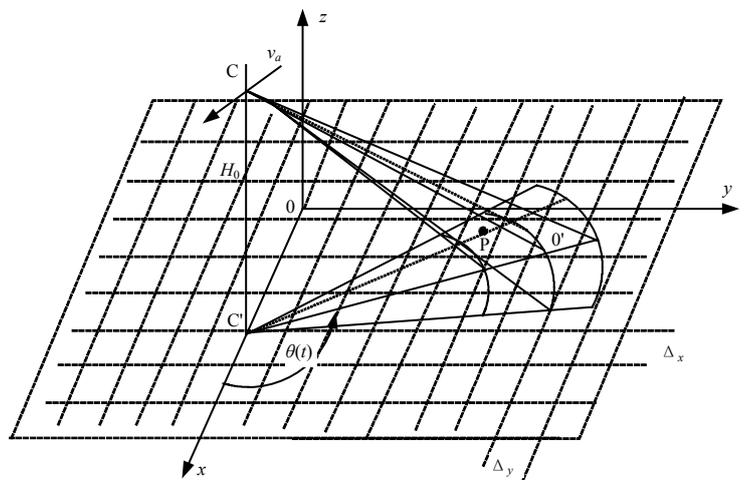


Fig.6 Geometry of distortion correction
图 6 t 时刻几何失真校正模型

显然该坐标系是随着天线转动而不断变化的, y' 与 x 轴所成角即为地面斜视角 $\theta(t)$ 。

建立 x' - y' 坐标系后, 只要能求得子图像素点在 x' - y' 坐标系中的坐标, 经过旋转平移变换就能得到其对应的地理坐标。下面具体给出像素点地理坐标的计算过程。

t 时刻的地面成像区域以 y' 轴呈对称分布。成像平面为 C 与过成像区中心 O' 且平行于 x' 轴的直线所成斜平面, 计算图像上各像素点的 y' 坐标:

$$y' = \sqrt{R^2 - H_0^2} \quad (5)$$

式中 R 为斜距。

若设 O' 点到 C 点的距离为 R_0 , 则 $R =$

$R_0 + N_r p_r$, N_r 为像素点对应图像中的位置, $p_r = \frac{c}{2f_s}$ 为距离向量化间隔, c 为光速, f_s 是采样频率。

假设子图像中位置 (N_r, N_t) 像素点与地面点 P 对应, 以 P 点为例说明 x' 轴坐标计算过程。采用线性 R-D 算法进行方位聚焦后, 散射点的方位向位置是由该点回波信号的多普勒频率与参考点之差决定。点 P 多普勒频率 f_{dc_p} 为:

$$f_{dc_p} = \frac{2}{\lambda} v_a \cos \alpha_p \quad (6)$$

式中 α_p 为 P 点对应的多普勒锥角。

根据各角度间相互关系, 有:

$$\cos \alpha_p = \cos [\theta(t) + \Delta\theta] \cos \psi$$

则式(6)可写成:

$$f_{dc_p} = \frac{2}{\lambda} v_a \cos [\theta(t) + \Delta\theta] \cos \psi \quad (7)$$

同理, 对于场景中心 O' , 即参考点有:

$$f_{dc_{o'}} = \frac{2}{\lambda} v_a \cos \theta(t) \cos \psi \quad (8)$$

方位向处理时要解决多普勒模糊问题, 尤其当大斜视时, 图像在方位向会出现“卷绕”现象。由于只能得到子图各像素点在图像矩阵中的坐标, 但是计算方位向几何失真校正时需要像素点的理论坐标, 即不存在多普勒模糊时的坐标, 这里, 笔者按照不同距离单元逐个计算各距离单元上像素点的理论坐标。由线性 R-D 算法得到的各子图像中, 成像区中心在图像域的方位坐标为 $N_{sub}/2$, N_{sub} 为子图方位向采样点数。因此可以根据波束当前指向, 由当前距离单元 y' 轴上点的多普勒频率与成像区中心之差确定该点在图像域中的方位向理论位置, 进而可通过对该距离单元上处于不存在多普勒模糊区间外的各点加(或减) N_{sub} 得到它们的理论坐标。图 8 为 $\theta(t)$ 分别等于 $46^\circ, 90^\circ$ 和 133° 时, 子图成像中 y' 轴上各点对应的不存在多普勒模糊时方位坐标变化曲线, 横坐标代表距离单元, 纵坐标代表 y' 轴上各点的方位坐标, 图中 2 条竖虚线之间为不存在多普勒模糊区间, 该区间外则会出现多普勒模糊, 在图像上表现为方位向“卷绕”。

P 点对应子图像素点在图像中方位向位置为 N_f , 假设 N_f 对应无多普勒模糊时理论坐标为 N'_f , 则由 $f_{dc_p} - f_{dc_{o'}} = N'_f \Delta f$ 可得:

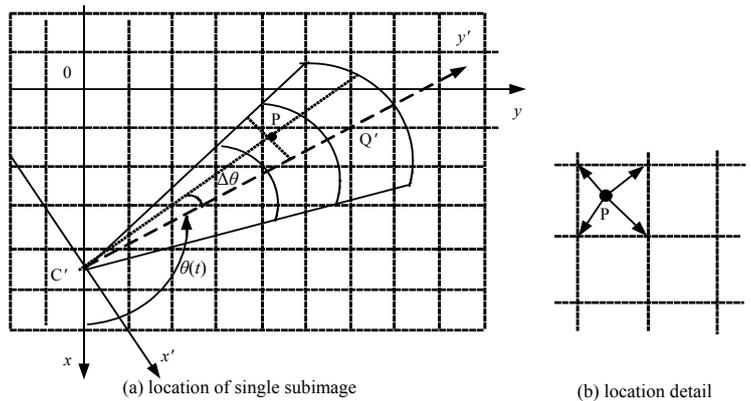


Fig.7 Sketch of distortion correction
图 7 t 时刻地面几何失真校正示意图

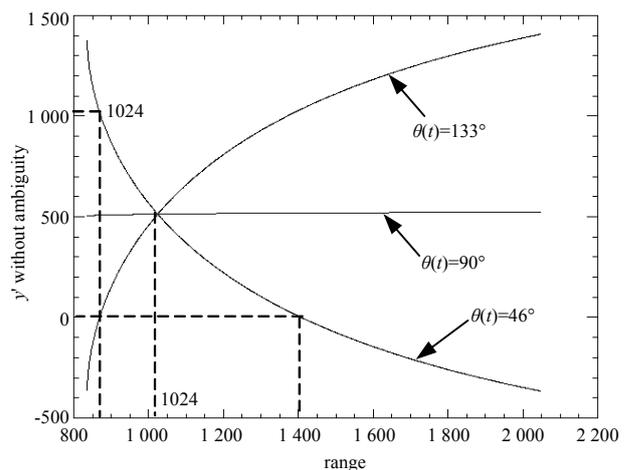


Fig.8 Azimuth coordinates of points located on y' without Doppler ambiguity
图 8 不存在多普勒模糊时 y' 轴上各点方位向坐标

$$\Delta\theta = \arccos \left[N_t \Delta f \frac{\lambda}{2v_a \cos\psi} + \cos\theta \right] - \theta \quad (9)$$

式中： $\Delta\theta$ 为 PC' 与 y' 轴夹角； $\Delta f = f_{PRF}/N_{sub}$ 为方位向量化间隔； f_{PRF} 为脉冲重复频率 (Pulse Recurrence Frequency, PRF)，P 点 x' 坐标为：

$$x' = y' \tan \Delta\theta \quad (10)$$

至此，P 点 x' 和 y' 坐标都已计算完毕，经坐标旋转平移变换即能得到点 P 地理坐标。旋转平移关系如下：

$$\begin{cases} x = x' \sin \theta(t) + y' \cos \theta(t) + x_{apc} \\ y = -x' \cos \theta(t) + y' \sin \theta(t) + y_{apc} \end{cases} \quad (11)$$

计算子图像素单元的地理坐标是逐点进行的，得到子图像中像素单元对应的地理坐标后，由于图像中的点不一定是地面校正网格点，所以需要将该点能量投影到与它临近的地面校正网格点上，实现几何失真校正。如图 7(b) 所示，由上述方法得到像素点 (N_x, N_y) 对应的地理坐标 (x, y) 后，将该像素点能量投影到与其相邻的校正网格点。实际运用中，该投影过程是通过插值实现的。完成对子图的几何失真校正之后，通过图像拼接就能得到完整的无几何失真的环视 SAR 图像。

3 实测数据成像结果及分析

某 Ku 波段机载环视 SAR 主要参数：天线以 $\Omega = 50^\circ/s$ 顺时针旋转，脉冲重复频率为 $f_{PRF} = 3\,000$ Hz，雷达作用距离为 5 000 m，载机飞行速度为 100 m/s。采用线性 R-D 算法进行子图成像时，距离向采样点数为 2 048，方位向采样点数为 1 024。环视 SAR 一周内数据分成 83 个子图进行处理。

图 9 为第 20 个子图处理结果，此时 $\theta(t) = 90.4^\circ$ ，为接近正侧视状态，图 9(a) 为运用线性 R-D 算法直接得到的子图，子图中的景象有很明显的几何失真，图 9(b) 为经过本文提出的几何失真校正方法校正，并将校正后子图存放到完整环视成像结果相应位置的成像结果；图 10 为第 38 个子图处理结果，此时 $\theta(t) = 167.2^\circ$ ，为斜视状态，同样，图 10(a) 为运用线性 R-D 算法直接得到的子图，由于此时雷达工作在大斜视状态，从图中不难发现几何失真的程度比正侧视时大很多，并且图像在方位向出现了“卷绕”现象，所以在几何校正过程中要同时考虑方位向“解模糊”问题，图 10(b) 为几何失真校正之后的成像结果。

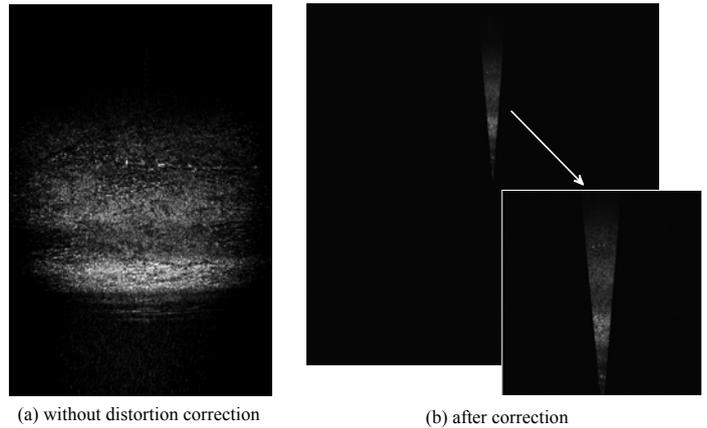


Fig.9 The 20th subimage of circular scanning SAR
图 9 环视 SAR 第 20 个子图成像处理结果

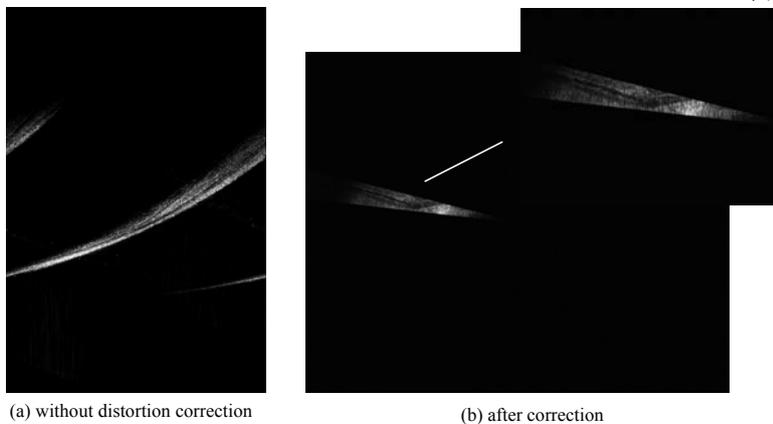


Fig.10 The 38th subimage of circular scanning SAR
图 10 环视 SAR 第 38 个子图成像处理结果

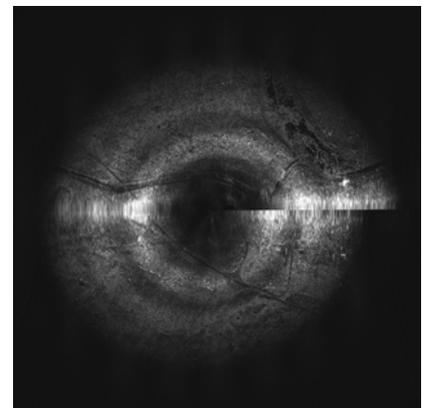


Fig.11 Image of circular scanning SAR
图 11 几何失真校正后环视 SAR 成像结果

从上面的子图成像结果不难看出，子图像均存在不同程度的几何失真，且随着斜视角增加愈加严重，这样的子图像对于图像拼接是很不利的。运用本文所提出的基于子图像素实际地理坐标的几何失真校正方法进行几何失

真校正之后,通过图像拼接得到完整的环视成像结果见图 11。载机沿图中水平方向飞行,载机正前方和正后方无法获得有用的多普勒信息,因而不能实现方位分辨。

4 结论

对于机载环视 SAR,采用先按天线方位指向分块实现子图成像,再拼接各子图像的成像处理方案。但是,环视 SAR 工作在波束扫描模式,天线不同方位指向时运用线性 R-D 算法成像所得各子图像都不同程度地存在几何失真,为得到满足设计要求的环视 SAR 成像结果,必须先对各子图进行几何失真校正,再完成图像拼接。本文提出了一种基于子图像素单元实际地理坐标的几何失真校正方法,并由实测机载环视 SAR 数据验证了该方法,得到成像结果,证明该方法是有效的。

参考文献:

- [1] Sun Bing,Zhou Yinqing,Li Tianchi,et al. Image Formation Algorithm for the Implementation of Circular Scanning SAR[C]// CIE'06 International Conference on Radar. Shanghai:[s.n.], 2006:1-4.
- [2] Ausherman D,Kozma A,Walker J,et al. Developments in Radar Imaging[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1984,20(4):363-400.
- [3] 朱岱寅,朱兆达,叶少华,等. 机载 SAR 斜视区域成像研究[J]. 电子学报, 2002,30(9):1387-1389. (Zhu Daiyin,Zhu Zhaoda, Ye Shaohua,et al. Studies on Airborne Squint-Looking SAR Patch-Mapping[J]. Acta Electronica Sinica, 2002,30(9): 1387-1389.)
- [4] 俞根苗,邓海涛,张长耀,等. 弹载侧视 SAR 成像及几何校正研究[J]. 系统工程与电子技术, 2006,28(7):997-1001.(Yu Genmiao,Deng Haitao,Zhang Changyao,et al. Study of imaging processing and geometric correction of missile-borne side-looking SAR[J]. SYSTEMS ENGINEERING AND ELECTRONICS, 2006,28(7):997-1001.)
- [5] 刘筱,皮亦鸣,冷传航. 一种高分辨率合成孔径雷达并行成像实现[J]. 信息与电子工程, 2008,6(1):24-28. (Liu Xiao,Pi Yiming,Leng Chuanhang. Implementation for High Resolution SAR Parallel Imaging[J]. INFORMATION AND ELECTRONIC ENGINEERING, 2008,6(1):24-28.)
- [6] Walter G Carrara,Ron S Goodman,Ronald M Majewski. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms[M]. New York:Artech House, 1995.
- [7] Li Yong,Zhu Daiyin,Zhu Zhaoda. Study on Geometric distortion Correction in the Subaperture Processing for High Squint Airborne SAR Imaging[J]. The Chinese Journal of Electronics(CJE), 2006,15(1):113-116.

作者简介:



高叶盛(1983-),男,浙江省绍兴市人,在读博士研究生,研究方向为 SAR 成像信号处理. email:ysgao@sjtu.edu.cn.

朱岱寅(1974-),男,江苏省无锡市人,教授,博士生导师,研究方向为雷达成像和信号处理.