

环视 SAR 几何失真校正误差分析及补偿技术研究

毛新华 朱岱寅 李勇 朱兆达

(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)

摘要: 环视合成孔径雷达(circular-scan SAR)主要用于在导弹精确末制导中进行景象匹配, 成像几何精度对最终的目标定位至关重要。由于 GPS/IMU 测量误差的存在, 使得环视 SAR 在采用基于 GPS/IMU 的成像几何失真校正方法进行校正后图像仍存在一定的失真。该文分析了环扫天线扫描角度误差和天线相位中心(APC)位置测量误差对成像几何失真校正的影响, 并针对环视 SAR 的特点提出了有效的基于数据的运动参数估计方法。实测数据处理结果验证了分析的正确性及补偿方案的可行性。

关键词: 环扫 SAR; 几何失真校正; 误差分析; 图像配准; 参数估计

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)11-2706-04

Study on Error Analysis of Geometric Distortion Correction and Compensation Techniques for Circular-Scan SAR

Mao Xin-hua Zhu Dai-yin Li Yong Zhu Zhao-da

(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Circular-Scan SAR is mainly used for scene matching in the precision-guided missiles, where geometry accuracy is very important. However, due to errors introduced by the GPS/IMU, it remains somewhat geometric distortion after geometric distortion correction based on the GPS/IMU data. This paper analyzes the impact of the error of scan angle and aircraft height and aircraft velocity on the image quality. Meanwhile, approaches to correcting these errors based on measured data are presented. Experiments carried out on measured data confirm the validity of the analysis and the feasibility of the compensation scheme.

Key words: Circular-scan SAR; Geometric distortion correction; Error analysis; Image registration; Parameter estimation

1 引言

合成孔径雷达(SAR)常用的成像模式有条带式、扫描式和聚束式, 这3种模式的成像区域均位于雷达飞行路线的一侧, 但在某些特殊场合, 例如对地攻击精确末制导中为了与已有参考图像准确匹配, 需要得到在飞行路线下方周围区域的雷达图像。环视合成孔径雷达(SAR)是为解决该问题而设计的一种特殊的成像模式(见图1)。由于环视 SAR 主要用于导弹末制导时的图像匹配定位, 图像几何精度至关重要, 因此成像过程中包含图像的几何失真校正也是必要的, 文献[1,2]采用基于距离-多普勒定位方程的几何失真校正方法, 在 GPS/IMU 测量参数无误差时, 能够得到无几何失真地面图像。但实际应用中 GPS/IMU 提供的运动参数不可避免地存在测量误差, 使得图像经过几何失真校正后仍会存在一定的失真, 文献[3,4]分析了弹载侧视条件下各种误差对几何失真校正及定位的影响, 但并没有给出补偿方案。本文在分析了天线扫描角度和 APC 位置测量误差对成像几何失真校正的

影响基础上, 针对环视 SAR 的特点提出了一种有效的基于数据的运动参数估计方法。实测数据处理结果验证了分析结果的正确性及补偿方案的可行性。

2 几何失真校正误差源分析

2.1 几何失真校正算法原理^[1,2]

本文子孔径成像处理采用线性距离-多普勒(range Doppler)算法。设子块成像几何关系如图2所示, 以孔径中心 O 点地面投影 O' 为原点建立坐标系, 孔径中心波束扫描

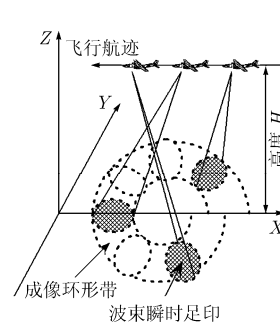


图1 环视 SAR 天线扫描示意图

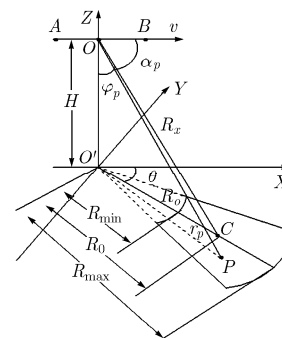


图2 子块成像几何

2007-05-08 收到, 2007-10-16 改回

国家自然科学基金(60502030)和航空基金(2006ZC52036)资助课题

方位角为 θ , 下视角为 φ , APC 高度为 H , OC 为孔径中心到子块场景中心的距离, R_0 是 OC 在地面的投影, 孔径中心坐标为 $O(0,0,H)$, 地面上任意散射点 $P(x,y,0)$ 到孔径中心点的斜距 r 为

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + H^2} \quad (1)$$

设 P 点到子孔径中心连线与载机航迹的夹角 α_p , P 点回波信号的多普勒频率为 f_p , 雷达发射信号波长为 λ , 载机速度为 v , 则有

$$f_p = \frac{2v}{\lambda} \cos \alpha_p = \frac{2vx}{\lambda \sqrt{x^2 + y^2 + H^2}} \quad (2)$$

式(1), 式(2)是等距离-多普勒方程, 确立了地面像素点 (x,y) 到距离-多普勒成像平面内像素点 (r, f_p) 的映射关系。基于这一关系的几何失真校正算法步骤如下:

第 1 步 根据天线波束指向确定地面校正区范围, 其中校正区内等间隔分布校正像素点;

第 2 步 对校正区内每一像素点 (x,y) , 通过式(1), 式(2)计算该点对应的斜距和多普勒坐标 (r, f_p) ;

第 3 步 由计算的 (r, f_p) 在原始图像中通过插值取出该点灰度值, 付给 (x,y) 对应的地面像素点。

2.2 几何失真校正误差源分析

2.2.1 天线扫描角度测量误差分析 在没有天线扫描角度误差时, 为减少校正的子块个数, 同时保证校正点都落在波束照射公共区内, 校正区选择与对应子孔径时间内波束照射公共区重合, 如图 3(a), 其中细实线框部分表示子孔径内波束照射公共区, 粗实线框表示子块校正区。设该子孔径中心时刻波束中心方位角为 θ , 波束地面足印宽度为 $\Delta\theta$, 子孔径时间内波束扫过 $\Delta\theta/2$, 则公共区宽度为 $\Delta\theta/2$, 子块校正区选择以 θ 角为中心、宽度等于公共区宽度, 即 $\Delta\theta/2$ 的扇形区域。当扫描方位角存在 θ_{err} 的误差时, 校正区中心线和实际波束公共区中心线将存在 θ_{err} 的偏离, 如图 3(b), 如果校正区宽度仍等于波束公共区宽度, 则将有 θ_{err} 的校正区偏离公共区, 因而这部分区域在成像时将得不到有效积累, 使拼接后相邻校正区图像之间产生不连续现象, 出现明显的拼接痕迹。

如果将校正区保持中心不变, 宽度减少 $2\theta_{\text{err}}$, 则可使减小后的校正区完全包含在公共区内, 如图 3(c)。因此, 通过将子块校正区宽度减小 $2\theta_{\text{err}}$, 可以允许天线扫描角度在 θ_{err} 范围内变化而不影响成像质量, 但为此付出的代价是子块个数增加, 脉冲复用率增加, 从而使运算量增大。

2.2.2 天线 APC 位置测量误差分析 式(1), 式(2)确立了地面校正点坐标到线性 RD 成像图像坐标的映射关系, 通过坐标变换实现了图像的几何失真校正。但从式(1)可知, 如果 APC 位置存在测量误差, 将引起几何校正后的图像在距离向发生漂移, 产生新的几何失真, 下面将详细推导 APC 位置测量误差对几何失真校正的影响。

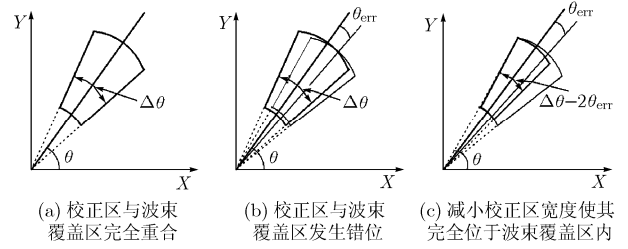


图 3 子孔径内波束足印公共区与校正区关系

设子孔径中心处 APC 存在位置误差时的坐标为 $(\Delta x, \Delta y, H + \Delta h)$, 场景中 P 点的坐标为 $(r_p \cos \theta_p, r_p \sin \theta_p, 0)$, 其中 r_p 为 P 点在地面坐标系中的极径, θ_p 为 P 点的极角, 则 P 点到孔径中心的斜距变为

$$r' = \sqrt{(\Delta x - r_p \cos \theta_p)^2 + (\Delta y - r_p \sin \theta_p)^2 + (H + \Delta h)^2} \quad (3)$$

对 r' 进行泰勒展开并忽略 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 的高次项, 得

$$r' \approx r + \Delta r_x + \Delta r_y + \Delta r_H \quad (4)$$

其中 $r = \sqrt{r_p^2 + H^2}$, 为无位置误差时的斜距。

$$\Delta r_x = -\frac{r_p \cos \theta_p}{\sqrt{(r_p \cos \theta_p - \Delta x)^2 + (r_p \sin \theta_p - \Delta y)^2 + (H + \Delta h)^2}} \Delta x \quad (5)$$

$$\Delta r_y = -\frac{r_p \sin \theta_p}{\sqrt{(r_p \cos \theta_p - \Delta x)^2 + (r_p \sin \theta_p - \Delta y)^2 + (H + \Delta h)^2}} \Delta y \quad (6)$$

$$\Delta r_H = \frac{H}{\sqrt{(r_p \cos \theta_p - \Delta x)^2 + (r_p \sin \theta_p - \Delta y)^2 + (H + \Delta h)^2}} \Delta h \quad (7)$$

分别表示由 X 方向, Y 方向及高度方向位置误差引起的斜距误差, 即距离向漂移量。

由式(5)–式(7)可知, 利用地面坐标到子图坐标的映射关系进行几何失真校正后, 由于天线位置存在测量误差, 校正后的图像将发生距离向的漂移, 其中由 $\Delta x, \Delta y$ 引起的漂移量与目标距离 r_p 及极角 θ_p 有关, 因此它们不仅使校正后图像发生整体漂移, 还将产生几何形变, 而 Δh 引起的漂移量只与目标距离位置及 APC 高度有关。设 $\varphi = 24.5^\circ$, $H = 4900$ m, $OC = 5500$ m, 子孔径长度 $L_{\text{sub}} = 10$ m, 图 4(a) 给出了在位置误差 $\Delta x, \Delta y, \Delta h$ 分别为 15m 时, 距离向 R_0 处 3 个距离漂移量随角度的变化关系, 图 4(b) 给出了某特定目标点 ($r = R_0, \theta = 50^\circ$) 的距离漂移量随位置误差量的关系曲线。从图中可以看出, 在位置测量误差不超过 15m 条件下, 由 $\Delta x, \Delta y$ 引起的误差较小, 最大均不超过一个分辨单元; 而由于波束下视角较大, 由 Δh 即高度误差引起的距离漂移量已将近两个分辨单元。因此为减小校正后的图像几何失真, 必须对 APC 高度进行精确估计。

3 基于实测数据的运动参数估计

在分析了环视 SAR 子块成像结果支撑区特征的基础上, 本文提出了一种基于校正后子图像能量最大准则的 APC 高

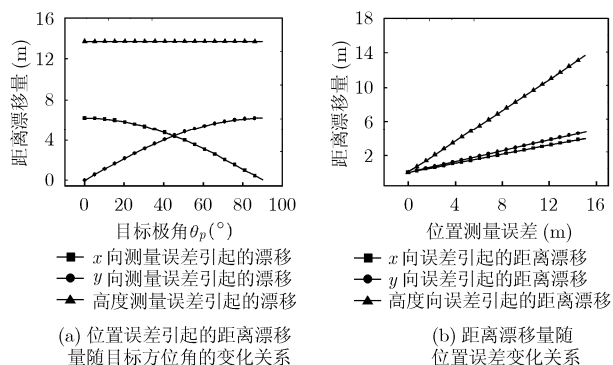


图4 位置误差引起的距离漂移

度误差估计方法。

3.1 环视 SAR 子块成像支撑区特征分析

子块成像几何见图2, 设 P 点为扇形区内任意一点, 坐标为 $(r_p \cos \theta_p, r_p \sin \theta_p, 0)$, 其中 r_p 为 P 点在地面坐标系中的极径, θ_p 为 P 点的极角, 且有 $R_{\min} \leq r_p \leq R_{\max}$, $\theta - \Delta\theta/2 \leq \theta_p \leq \theta + \Delta\theta/2$, R_{\min} , R_{\max} 为校正区的距离向边界, θ 为校正区中心线极角(只考虑 $\Delta\theta/2 \leq \theta \leq \pi/2 - \Delta\theta/2$), $\Delta\theta$ 为校正区宽度。通过距离-多普勒映射后的距离和多普勒坐标为

$$r = \sqrt{r_p^2 + H^2} \quad (8)$$

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \frac{r_p}{\sqrt{r_p^2 + H^2}} \cos \theta_p \quad (9)$$

因此, 可以得到

$$\Delta r = r_{\max} - r_{\min} = \sqrt{R_{\max}^2 + H^2} - \sqrt{R_{\min}^2 + H^2} \quad (10)$$

$$\Delta f_d = \frac{2v}{\lambda} \frac{r_p}{\sqrt{r_p^2 + H^2}} \sin(\Delta\theta) \sin \theta \quad (11)$$

其中 Δr , Δf_d 分别为映射后图像距离向和多普勒方向支撑区宽度。由式(10), 式(11)可知, 扇形校正区通过距离-多普勒映射后, 距离向支撑区宽度只由极径范围决定, 与斜视角没有关系, 而多普勒支撑区宽度不仅随校正点极角变化, 同时还与极径有关。在前斜视情况下($\theta \rightarrow 0$), $\Delta f_d \rightarrow 0$, 即方位多普勒支撑区将变得很窄。同时由式(9)可知, 此时方位支撑区中心随距离变化较快(因为 $\cos \theta_p \rightarrow 1$)。图5给出了在不同斜视角条件下, 扇形校正子块通过线性 RD 成像后的仿真结果。在子块校正区宽度为 $\Delta\theta = 4^\circ$ 及上述参数条件下, 中心距离单元在正侧视时多普勒支撑区占据 75 个像素单元(占整个方位宽度的约 1/4), 在 $\theta = 2^\circ$ 时只占据 4 个像素单元。

3.2 基于配准图像能量最大准则的 APC 高度误差估计

从上面分析可知, 大斜视角($\theta \rightarrow 0$)时由于多普勒分辨率很差, 图像方位支撑区变得很窄, 而且方位多普勒支撑区位置随斜距快速变化, 因此较小的距离漂移就会使校正区映射后的图像支撑区和实际波束照射区成像支撑区有很大错位, 从而使地面校正点通过映射后找不到有效像素点, 几何失真校正后图像能量急剧下降。

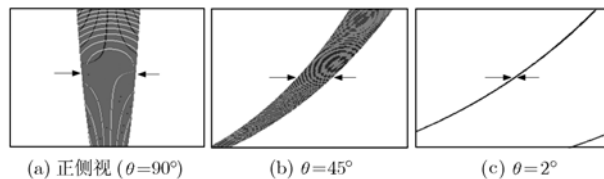


图5 不同斜视角下的 RD 图像支撑区特征, 横向为多普勒域, 纵向为距离域

利用 APC 高度误差引起的距离漂移量大且不随斜视角变化及大斜视时校正后子图像能量对高度误差高度敏感这一特点, 本文提出了基于几何失真校正后图像能量最大准则的 APC 高度误差估计方法。

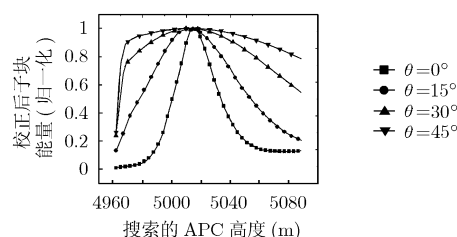
采用在 $\theta \rightarrow 0$ 的子孔径内, 对高度进行一维搜索, 找到几何校正后的子图像能量最大时对应的高度作为 APC 平台实际高度。具体实现步骤如下:

第 1 步 判断波束扫描角是否满足 $\theta \rightarrow 0$, 只在这个区域子孔径内进行一次高度校正;

第 2 步 在实际测量高度值上下一定范围内进行一维搜索, 对搜索范围内的每一个高度值 h , 对该子块成像并进行几何失真校正, 计算得到几何校正后的子图像能量值 $E(h)$;

第 3 步 取子图像能量最大值对应的高度作为 APC 的实际高度。

为了验证在大斜视时校正后子图像能量对高度的敏感性, 图6给出了某实测数据在不同斜视角下 $E(h)$ 随假设高度的变化曲线, 从中可以看出, 为了保证精度, 高度估计必须在高斜视($\theta \rightarrow 0$)时进行。

图6 校正后子块图像能量 E (归一化) 随搜索的高度变化曲线

4 实测数据处理

下面给出实测数据处理结果, 其中天线波束地面足印宽度 $\Delta\theta = 9.34^\circ$ 。为更好地验证角度误差的影响, 人为地加入 2° 的角度测量偏差, 如果不减小校正区宽度, 成像结果如图7(a)所示, 可以看到明显的图像拼接痕迹; 通过减小校正区宽度, 增加子块个数, 可以明显改善图像质量, 消除角度误差的影响, 如图7(b)。

图8(a), 8(b)给出了 APC 高度校正前后的处理结果, 可以看到, 未补偿高度时, 图像前后方会因为漂移而产生明显的无图像区, 而补偿后得到了有效校正; 为了验证补偿后几何变形的减小, 在图像中取两特殊点测量两点之间的距

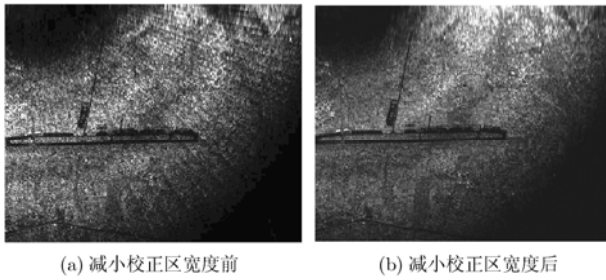


图 7 有扫描角度测量误差时成像结果(机场附近)

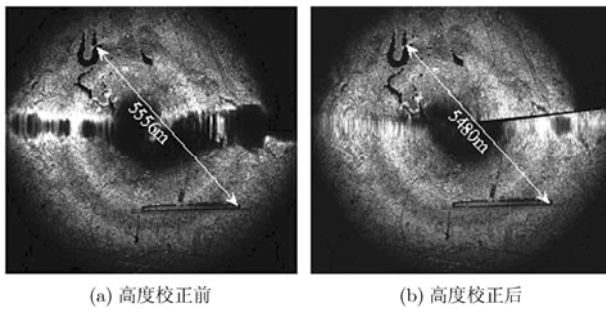


图 8 环视 SAR 图像

离, 与加拿大 RadarSat 录取的经几何校准后的图像进行了对比, 其中, 环视 SAR 图像补偿前两点间距离为 5556m, 补偿后为 5480m, 从 RadarSat 图像测得的距离为 5489m, 由此可见该补偿方案能够有效补偿高度误差引起的几何形变。

5 结束语

环扫 SAR 主要用于在导弹精确末制导中进行景象匹配, 要求成像结果几何精度高。环扫 SAR 高几何精度成像难点在于图像的拼接和几何失真校正, 而影响它们的最主要因素是成像的几何关系。本文详细分析了天线扫描角度和 APC 位置测量误差对成像几何精度的影响, 并利用环视 SAR 的特点提出了基于数据的高度误差估计方法, 实测数据处理结果验证了分析的正确性和补偿方法的有效性。

参 考 文 献

[1] Li Yong, Zhu Daiyin, and Zhu Zhaoda. Study on geometric

distortion correction in the subaperture processing for high squint airborne SAR imaging. *Chinese Journal of Electronics*, 2006, 15(1): 113-116.

[2] 孙文峰, 陈安等. 一种新的机载 SAR 图像几何校正和定位算法. *电子学报*, 2007, 35(3): 553-556.

Sun W F and Chen A, *et al.* A novel geometric calibration and target location algorithm for air-borne SAR image. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(3): 553-556.

[3] 燕英, 周荫清等. 弹载合成孔径雷达成像处理及定位误差分析. *电子与信息学报*, 2002, 24(12): 1932-1938.

Yan Y and Zhou Y Q, *et al.* Missile-borne SAR imagings and error analysis of positioning. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2002, 24(12): 1932-1938.

[4] 余根苗, 邓海涛, 吴顺君等. 弹载 SAR 图像几何失真校正误差分析. *电子与信息学报*, 2007, 29(2): 383-386.

Yu G M and Deng H T. *et al.* Error analysis of geometric distortion correction of missile-borne SAR image. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(2): 383-386.

[5] Blacknell D and Ward I A. Motion compensation and geometric distortion in airborne SAR imagery. *ESA Proceedings of the International Symposium on Progress in Imaging Sensors*, 1986: 539-548.

[6] Quegan S. Measurement of geometric distortion in airborne SAR images, *ESA IGARSS 1984*, Vol. 2 : 595-599.

[7] Brown L G. A survey of image registration techniques. *ACM Computer Surveys*, 1992, 24(4): 325-376.

[8] Yeo T S, Tan N L, Zhang Chengbo, and Liu Yihui. A new subaperture approach to high squint SAR processing. *IEEE Trans. on GRS*, 2001, 39(5): 954-968.

毛新华: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为雷达成像和空时自适应处理.

朱岱寅: 男, 1974 年生, 副研究员, 主要研究方向为雷达成像和信号处理.

李 勇: 男, 1977 年生, 讲师, 主要研究方向为雷达成像和信号处理.

朱兆达: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达信号检测和处理.